

流域梯级水电站负荷短期联合优化调度研究

郑 凯, 蒋致乐, 刘明礼, 宋坤隆

(国家能源集团科学技术研究院有限公司成都分公司, 四川 成都 610072)

摘要: 梯级水电站之间往往距离较近, 水力和电力联系紧密, 开展梯级水电站负荷短期联合优化调度, 可降低发电水耗, 在有限水量的基础上发更多的电量, 取得更大经济效益。本文根据梯级电站运行实际情况, 提出基于电站投入顺序的动态规划算法, 构建以梯级消耗水位势能最小为目标的日计划梯级电站负荷分配模型, 实现了日发电计划下的流域梯级负荷优化分配。同时分析日计划下的梯级电站优化分配时考虑径流和负荷偏差不全的不足, 构建梯级电站实时负荷分配模型, 通过对流域梯级电站选取典型日和时段运行数据进行实例分析, 并与实际运行进行对比, 结果表明流域梯级电站单日运行实时优化调度负荷分配比实际运行中负荷分配耗用的水能少 4 090.84 kW·h, 发电效益得到明显提高。流域梯级水电站负荷短期联合优化调度和实时优化策略可有效提升梯级发电效益, 在工程实践中有一定的指导意义。

关键词: 梯级水电站; 负荷分配; 短期调度; 优化调度; 动态规划

中图分类号: TM715

文章编号: 1674-8069(2023)04-305-09

文献标识码: A

DOI 编号: 10.19944/j. eptep. 1674-8069.2023.04.005

[引用本文格式]郑 凯,蒋致乐,刘明礼,等.流域梯级水电站负荷短期联合优化调度研究[J].电力科技与环保,2023,39(4):305-313

ZHENG Kai,JIANG Zhile,LIU Mingli, et al. Study on short-term joint optimal operation of cascaded hydropower stations[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection ,2023,39(4):305 -313.

Study on short-term joint optimal operation of cascaded hydropower stations

ZHENG Kai, JIANG Zhile, LIU Mingli, SONG Kunlong

(China Energy Science And Technology Research Institute Co. Ltd Chengdu Branch, Chengdu 610072, China)

Abstract: The distance between cascade hydropower stations is often close, and the hydraulic and electric power are closely connected. Carrying out short-term joint optimization scheduling of cascaded hydropower stations can reduce water consumption for power generation, generate more electricity on the basis of limited water volume, and achieve economic power generation. According to the actual operation of cascade power stations, a daily planned load distribution model of cascade power stations is constructed with the goal of minimizing the potential energy of the water level consumed by the cascade, and a dynamic programming algorithm based on the order of power station input is proposed to optimize the solution, so as to realize the optimal load distribution of the river basin cascade under the daily power generation plan. At the same time, the shortcomings of optimizing the allocation of cascaded power plants under the daily plan are analyzed, and a real-time load distribution model for cascaded power plants is constructed. By selecting typical daily and time period operation data for example calculation of basin cascaded power plants, and comparing it with actual operation, the results show that the real-time optimized scheduling load distribution of basin cascaded power plants in a single day operation consumes 4090.84 kW·h less water energy than the actual load distribution in operation, The efficiency of power generation has been significantly improved. The short-term joint optimization scheduling and real-time optimization strategy for the load of cascade hydropower stations in the basin can effectively improve the benefits of cascade power generation, which has certain guiding significance in engineering practice.

Key words: cascade hydropower stations; load distribution; uncontrollable interval; short-term scheduling; optimal dispatching; dynamic programming

收稿日期: 2023-05-10

基金项目: 国家能源集团科学技术研究院有限公司科技项目(CD2021Y001)

1 引言

自习近平主席宣布中国碳达峰、碳中和的目标以后, 电力行业的发展路径广受关注与热议^[1]。水电作为清洁的可再生能源, 在我国能源发展中有着重要的地位, 对经济社会的可持续发展具有重要支撑作用。随着我国各大梯级水电站群的相继建成, 流域梯级电站联合优化运行已成为水能高效利用的重要手段。

梯级水电站之间往往距离较近, 水力和电力上联系紧密, 利用现代系统分析和数学方法指导流域梯级电站负荷优化分配, 可提高发电效益, 做到降低水耗, 维持发电用水量和电力生产的相对动态平衡, 在有限水量的基础上发更多的电量, 从而实现经济发电。世界各国水电站优化运行经验表明, 根据运行实际编制科学合理的优化调度方案, 在费用增加但投入不多的情况下, 可以使梯级水库发电效益提高2%~5%^[2]。在整个优化调度过程中, 短期优化调度是提升发电效益的手段^[3], 许多学者对此开展了研究。路志宏等人^[4]、郭富强等人^[5]、葛晓琳等人^[6]、徐东斌^[7]在短期优化调度模型、约束条件、负荷预测偏差等方面开展了研究。王旭等人^[8]、冯雁敏等人^[9]、古家平等人^[10]、张高峰等人^[11]在调度模型计算、算法改进等方面开展了研究。上述基于流域梯级短期优化调度的相关研究侧重点不同, 可以达到优化目的, 对提高发电效益有一定效果。但部分研究的模型、算法过于复杂, 或未充分考虑电网实际运行方面的要求, 在工程应用中存在一定的局限性。

本文在电网实际调度的背景下, 首先以满足流域梯级电站和电网端约束为条件, 以提升流域梯级发电效益为目标, 制定满足约束要求的流域梯级短期负荷分配方案, 其次分析总结梯级实时调度的关键技术, 简化实时调度模型和计算过程, 最后通过某流域梯级电站典型日调度过程案例, 验证实际优化调度效果。

2 研究方法

水电站群短期优化调度, 是根据流域水情实时数据, 通过数据库管理系统, 电网调度自动化系统,

在满足水库径流(预报)、水位边界条件、下游综合用水要求、系统给定水电厂入库流量、特征负荷以或调峰能力总和的前提下, 快速准确地完成电站水库经济调度及负荷分配^[12]。

水电站群短期优化调度中要解决的问题, 从空间上可以分为水电站群各电站之间的负荷优化分配和每个水电站机组之间的负荷优化分配两个部分, 而从时间上则可以分为周/日和实时优化调度两个部分^[13]。短期优化调度一般以日优化运行为主要方式。流域梯级电站按照日发电计划运行^[14], 但是由于调度临时调整负荷、来水径流、天气预测偏差等原因, 往往在实际运行过程与前日制定的发电计划存在偏差^[15], 这就需要流域梯级电站在日发电计划的基础上, 快速响应电网负荷的实时变化。

2.1 基于日发电计划的站间负荷优化分配

当上级调度部门下达当日流域梯级总的发电负荷计划后, 流域梯级电站根据实时水雨情况、运行工况等信息, 在满足各时段梯级发电与所需负荷平衡的条件下, 制定各电厂的日发电计划, 具体包括开停机计划、站间负荷分配计划等。调度计划的确定, 可以确保机组充分利用高效率区进行发电^[16], 提高水能利用率、联合躲避振动区以及减少机组启停次数。这里以梯级耗能最小^[17]为目标建立流域梯级水电站站间负荷优化分配模型。

2.1.1 目标函数

$$F = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n Q_i(P_{i,t}) \cdot H_{i,t} \cdot \Delta t \quad (1)$$

式中: F 为流域梯级在 t 时段末期耗能最小; $Q_i(P_{i,t})$ 为第 i 个电站在 t 时段、平均出力为 $P_{i,t}$ 时的出库流量; $H_{i,t}$ 为第 i 个电站在 t 时段平均水头; Δt 为调度时段间隔。

2.1.2 约束条件

1) 系统负荷平衡约束

$$P_{L,t} = \sum_{i=1}^n P_{i,t} \quad (2)$$

式中: $P_{L,t}$ 为流域第 t 时段给定总负荷; $P_{i,t}$ 为第 i 个电站在 t 时段平均出力。

2) 计划发电量约束

$$W_i = \sum_{t=1}^T P_{i,t} \cdot \Delta t \quad (3)$$

式中： W_i 为第 i 电站在调度时段内的计划电量、 $P_{i,t}$ 为 t 时段第 i 电站的出力。

3) 流域梯级电站出力限制

$$P_{i,t}^D \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^U \quad (4)$$

式中： $P_{i,t}^U$ 、 $P_{i,t}^D$ 分别为第 i 个电站在 t 时段出力的上下限。

4) 梯级电站间水流联系

$$I_{i,t} = Q_{i,t}^{qj} + Q_{i-1,t-\tau} \quad (5)$$

式中： $I_{i,t}$ 是第 i 电站在 t 时段入库流量， $Q_{i,t}^{qj}$ 是第 i 电站在 t 时段区间流量， τ 为第 $i-1$ 电站出库流量到达第 i 电站的滞后时间， $Q_{i-1,t-\tau}$ 第 $i-1$ 电站在 $t-\tau$ 时段出库流量（包括发电流量、生态流量以及弃水流量等）。

5) 电站有功功率平衡约束

$$P_{ij} = \sum_{j=1}^n P_j \quad (6)$$

式中： P_{ij} 为第 i 电站总出力， P_j 为电站 i 的 j 号机组的有功功率。

6) 水库特性约束

① 水库水量平衡约束：

$$V(t+1) = V(t) + [Q_{rk}(t) - Q_{ck}(t) - Q_{qs}(t)] \cdot \Delta t \quad (7)$$

式中： $V(t)$ 、 $V(t+1)$ 分别为 t 时段初、末期水库蓄水量； $Q_{rc}(t)$ 、 $Q_{ck}(t)$ 、 $Q_{qs}(t)$ 分别为 t 时段平均入库、出库和弃水流量。

② 库水位约束

$$Z_{sy}^{\min}(t+1) \leq Z_{sy}(t+1) \leq Z_{sy}^{\max}(t+1) \quad (8)$$

式中： $Z_{sy}(t+1)$ 、 $Z_{sy}^{\max}(t+1)$ 、 $Z_{sy}^{\min}(t+1)$ 分别为 t 时段末期上游水位、允许最小及最大水位。

③ 库容曲线约束

$$Z_{sy}(t+1) = f_{zv}[V(t+1)] \quad (9)$$

式中： $f_{zv}[V(t+1)]$ 为库容曲线函数。

7) 水电站特性约束

① 机组出力限制约束

$$P_j^{\min} \leq P_j \leq P_j^D(H_j) \quad (10)$$

$$P_j^U(H_j) \leq P_j \leq P_j^{\max}(H_j) \quad (11)$$

式中： $P_j^U(H_j)$ 、 $P_j^D(H_j)$ 分别为电站 i 的 j 号机在工作水头为 H_j 时的振动区高限和低限； $P_j^{\max}(H_j)$ 为电站 i 的 j 号机组在工作水头为 H_j 时的最大出力限制。

② 机组工作水头约束

$$H_j^{\min} \leq H_j \leq H_j^{\max} \quad (12)$$

式中： H_j 、 H_j^{\min} 、 H_j^{\max} 分别为电站 i 的 j 号机组工作水头，最小工作水头，最大工作水头。

③ 机组流量特性约束

$$Q_j = Q(P_j, H_j) \quad (13)$$

式中： Q_j 是电站 i 的第 i 台机组在一定出力 P_j 和水头 H_j 条件下的最优发电耗流量。

④ 机组流量约束

$$Q_{j,\min} \leq Q_j \leq Q_{j,\max} \quad (14)$$

式中： $Q_{j,\max}$ 、 $Q_{j,\min}$ 分别为电站 i 的 j 号机组发电所耗流量的最大最小值。

⑤ 初始条件约束

$$Z_{sy}(1) = Z_{sy}^0 \quad (15)$$

式中： Z_{sy}^0 为计划期初始库水位。

⑥ 机组最小开停机时间约束

$$t_{j,on} \geq T_{j,on} \quad t_{j,off} \geq T_{j,off} \quad (16)$$

式中： $t_{j,on}$ 、 $t_{j,off}$ 分别为电站 i 的 j 号机组开停机时间； $T_{j,on}$ 、 $T_{j,off}$ 分别为电站 i 的 j 号机组最小开停机时间。

8) 非负约束

各种变量必须为非负值。

2.1.3 求解方法

某目标设为梯级总耗水量最小，采用动态规划法^[18]计算步骤如下：

1) 按照动态规划法原理作相应的数学表达：

① 阶段变量：将可投入电站作为阶段变量。如机组编号为 $i=1,2,\dots,n$ ， i 可作为阶段变量；

② 状态变量：为从开始阶段起至第*i*阶段投入工作，电站出力的累积值*P*作为状态变量；

③ 决策变量：将上述第*i*阶段相对应电站*i*的发电出力*P*作为该阶段的决策变量；

④ 状态转移方程： $\overline{P}_i = \overline{P}_{i-1} + P_i$ 。

动态规划算法适用于优化调度求解，但计算过程中，随着电站及机组增多、时段增加、离散步长的选取，其计算耗时将会大大增加，甚至逐渐陷入“维数灾”^[19-20]问题。对此，需要对负荷优化分配的计算过程进行优化。通过站内负荷优化模型^[21]可以得到在某一水头下水电站的最优耗水特性曲线，同时根据梯级负荷日发电计划，可以首先分析确定以电站为单元的状态空间可行域，然后在状态空间可行域范围内选取合理的偏差进行状态离散取值。

2) 电站投入顺序组合

流域梯级电站投入顺序是当电网调度负荷指令发生变化时，流域梯级电站参与负荷调整的先后顺序。电站排序的原则为：优先增加调节性能好的电站出力，优先减少调节性能差的电站出力，以提高梯级运行水头，无调节能力的电站按照实际入流进行计算；调节能力相同的电站，则按上游先发电，下游后发电的原则确定顺序。并实时采集各电站机组工况、有功功率、水头等数据，按照上述方法计算，形成电站增、减负荷动态顺序表。

当流域梯级电站在某一时段出现负荷变动指令时，根据上述电站排序原则，确定初步的电站顺序，按照排序逐步计算各电站的出力上限或下限并累加，直到电站组合的可调区间能够消纳流域梯级电站负荷变动量，从而确定梯级负荷变动指令的电站响应组合。下面以流域增负荷为例进行说明：

① 当流域梯级电站在时段出现增负荷指令时，根据电站排序原则，确定初步的电站顺序，首先假定电站组合为1个，判断优先级最高电站的上可调区间能否满足梯级需要增加的负荷量，若满足，则确定该电站为本次参与调整的电站；若不满足，则判断次一级电站是否满足，顺序推求单站能否消纳流域梯级负荷增量；若所有电站均不满足，则转入步骤②。

② 增加电站组合为2个，按照优先级由高到低，进行两站组合，判断可调区间是否满足要求，

若满足，则确定电站组；若不满足，则依次增加电站组合，重复以上步骤直至确定合适的电站组合。

流域减负荷需求下，其电站组合方法计算过程与增负荷相同。

3) 建立递推方程：

$$Q_i(\overline{P}_i) = \min \{ Q_i(P_i) + Q_{i-1}(\overline{P}_{i-1}) \} \tag{17}$$

式中： $Q_i(\overline{P}_i)$ 为流域梯级电站负荷为 \overline{P}_i 时，在1~*i*个电站之间优化分配负荷时流域总工作流量； $Q_i(P_i)$ 为在第*i*个电站负荷为 P_i 时的工作流量。

在满足约束条件时，由上面递推方程（17）可以得到梯级电站负荷为 \overline{P}_i 时，在*i*个电站之间优化分配方案：

$$F = f(\overline{P}_i, i) \tag{18}$$

4) 站内负荷分配模型对各电站的负荷进行分配计算，得出各电站机组的出力计划，并计算在相应方案下梯级总耗水量，选取耗水量最小的一组作为最优方案，输出计算结果，并进入下一阶段计算。

流域梯级电站日发电计划下的负荷分配计算流程见图1。

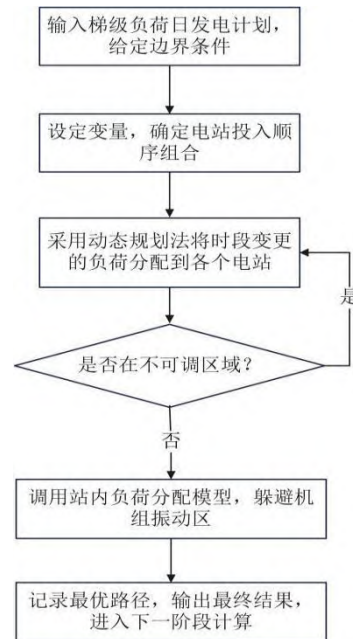


图1 流域梯级电站日发电计划下的负荷分配计算流程

Fig.1 Calculation flow of load distribution under daily generation plan for cascade hydropower stations

2.2 梯级负荷实时优化调度

流域梯级电站通过预测未来一日径流和负荷来

制定日发电计划^[22]，但是通常会出现日发电计划在实际使用中存在偏差，这是由于径流与负荷预测存在一定的误差，当误差超过一定程度，比如电网用电需求的变化，需要电站临时增加或减小出力，会造成运行曲线偏离原发电计划；日调节或引水径流式电站实际来水突增，若按照原日发电计划运行，可能会出现弃水现象。需要根据偏差建立实时调度模型，完成梯级负荷的重新分配，而沿用 2.1 中基于日发电计划的梯级负荷分配算法，在实际运行中，若流域梯级负荷在较小变化下，各电站出力方案产生较大改变，其计算的时效性往往达不到要求，同时也不利于整个流域梯级的电量和水量稳定。以梯级电站运行偏差（如负荷偏差、径流偏差等）作为计划调整条件，当偏差超过一定约束，则需要应用实时调度模型，对梯级负荷进行重新分配，并修正短期发电计划。

2.2.1 梯级实时调度关键问题

梯级实时调度的核心就是检验日发电计划的合理性，根据电站实时状态及电网动态决定是否进行优化调整，一旦进行调整，就应满足时效性和合理性要求，其中涉及如下几个关键技术问题：

1) 实时调度过程与运行联系紧密，只要已出现偏差就进行调整，这种方式显然是不合理的；然而过晚进行调整又会影响到梯级水电的安全经济运行。如何判断调整的时机，是实时调度的关键问题。

从电站负荷预测偏差的角度看，梯级电站的日发电计划是在预测次日来水和负荷需求的基础上制定的，然而在实际调度过程中，当调度实时负荷指令与原计划出现偏差时，超过一定程度时就不能满足电网运行要求，需要重新对梯级电站的出力进行分配；在微小扰动的情况下，满足一定约束条件，其出力计划可不做调整，由机组惯性和系统负荷特性吸收。

从径流偏差的角度看，若电站实际径流过程相对预测值偏大或偏小，电站仍然执行原日发电计划，电站水位过程会偏离原计划水位过程，当超过一定裕度，会造成电站弃水或低水位运行。这种情况不利于电站安全经济运行，需要设置水位限值约束，当水位越限，使用实时调度模型进行调整。

2) 机组和电站由于机组特性、负荷所处的位

置、功率采样精度等原因，造成其存在一定的电站功率不可调区间（即死区）。为避免负荷实时分配时在不可调区间内频繁调整，长时间达不到相对稳定态，一般在实时负荷分配时，流域梯级电站及机组都应该设定合理的功率死区^[23]，同时保证梯级电站、机组负荷均在各自的死区范围内。

3) 部分流域或电站由于其本身特性和所处电网的位置，按照电网《两个细则》^[24]要求同时投入电网 AGC 和一次调频运行。AGC 与一次调频的目标都是使系统出力与负荷相匹配，保持频率在额定值附近，但是由于因目前电网控制方式，AGC 与一次调频在控制上会出现时差，甚至会出现 AGC 指令与一次调频反向的情况，这时若不区分优先权，AGC 与一次调频同时动作，且在一定范围内频繁调整，可能影响电站的安全稳定运行。因此可以采取以下方式：在 AGC 有新指令或调节过程中，一次调频动作时若调节方向指令相同，则调节量相互叠加，若调节指令方向相反，则根据区域电网特性，确定优先权，闭锁低优先级的反向调节指令。

4) 在实时调度对日发电计划进行调整过程中，根据电站的调节类型不同，需要有不同的处理方式。调节能力强的电站，因为水位在实时调度时段中变化较小，其处理方式较为简单，一般考虑负荷预测偏差；日调节能力的电站，其水库库容较小，水库水位控制对于电站发电运行来说要求较高，既不能拉空运行，又要尽量避免弃水，需要综合考虑负荷偏差和径流偏差问题；无调节能力的引水径流式电站则按实际入流进行计算。

2.2.2 基于耗水发电量平衡的梯级实时调度模型

由于一般的模型算法求解时间通常都较长，很难满足梯级电站调度对于实时性的要求，本文建立基于耗水发电量平衡的梯级实时调度负荷分配方式，以达到实时性的要求。

1) 调度模型

根据当前流域梯级电站当前发电耗水率，应用水量电力平衡法对梯级各电站的发电负荷进行初始分配，然后进行站内负荷分配以验证出力是否在可调区间内，若不在就以联合躲避不可调区间结合梯级水库水位能耗用最少为目标优化调整各电站出力至可调区间。

当某一时刻流域梯级电站给定的总负荷为 \bar{P}_t ，梯级最上游水库电站的发电耗水率为 r_0 ，发电耗水量为 Q_0 ，下游各电站的发电耗水率分别为 r_1, r_2, \dots, r_n ，区间流量分别为 Q_1, Q_2, \dots, Q_n ，根据电力电量平衡原则有如下等式：

$$\bar{P}_t = \frac{Q_0}{r_0} + \frac{Q_0 + Q_1}{r_1} + \frac{Q_0 + Q_1 + Q_2}{r_2} + \dots \quad (19)$$

通过整理可得：

$$Q_0 \cdot \sum_{i=0}^n \frac{1}{r_i} + \sum_{i=0}^n \left(\frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{r_i} \right) \quad (20)$$

令 $\sum_{i=0}^n \frac{1}{r_i} = a$ ， $\sum_{i=0}^n \left(\frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{r_i} \right) = b$

最终得出：

$$Q_0 = \frac{\bar{P}_t - b}{a} \quad (21)$$

2) 约束条件

$$\max \left\{ \bar{P}_t - \sum_{i=1}^n P_{i,t} \right\} < \delta \quad (22)$$

式中： \bar{P}_t 为第 t 时段流域梯级的给定负荷； $\sum_{i=1}^n P_{i,t}$ 为 t 时段第 i 个电站的出力； δ 为功率死区，即进入死区后，停止计算。

$$Q_{i,t}^{\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,t}^{\max} \quad (23)$$

式中： $Q_{i,t}$ 为 t 时段第 i 个电站的流量； $Q_{i,t}^{\max}$ 、 $Q_{i,t}^{\min}$ 分别为 t 时段第 i 个电站的流量最大值与最小值。

$$H_{i,t}^{\min} \leq H_{i,t} \leq H_{i,t}^{\max} \quad (24)$$

式中： $H_{i,t}$ 为 t 时段第 i 个电站的水位； $H_{i,t}^{\max}$ 、 $H_{i,t}^{\min}$ 分别为 t 时段第 i 个电站的水位最大值与最小值。

$$P_{i,t}^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\max} \quad (25)$$

式中： $P_{i,t}$ 为 t 时段第 i 个电站的水位； $P_{i,t}^{\max}$ 、 $P_{i,t}^{\min}$ 分别为 t 时段第 i 个电站的水位最大值与最小值。

其余约束条件与 2.2.2 节的相同。

根据梯级电站各站的机组振动区，可以得到电站在不同机组组合下的不可调区间，如某电站在一台机组运行存在不可调区间，经过优化后两台及以

上机组运行时不存在不可调控区。随着参加运行的机组台数增加，不可调区间会越来越小，直至没有，但是在一台机组运行时就必然存在不可调区间，此时若要避开，就必须新开一台机组，或者在调度要求固定机组运行时，此时就会出现机组在不可调区间运行的情况，影响机组的安全稳定运行。可根据其余电站的可调节区间在一定程度上协同调配负荷来解决上述问题，显著扩大整个流域梯级电站的出力可运行区间。实时调度模型求解流程如图 2 所示。

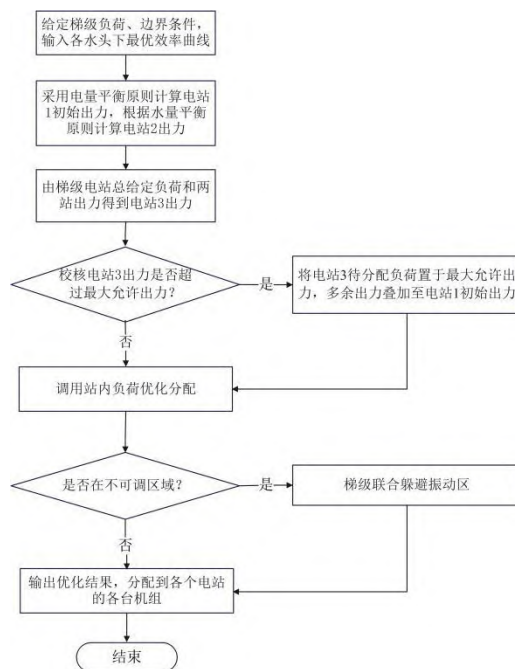


图 2 流域梯级实时调度负荷分配计算流程

Fig.2 Calculation process for real-time dispatch load distribution of watershed cascades

3 实例分析

3.1 流域电站概况

选取某流域梯级电站，电站从上游到下游的排列，依次命名为电站 1、电站 2、电站 3，各电站概况见表 1。

3.2 实例计算与分析

3.2.1 短期负荷分配

根据该流域梯级电站的调节能力^[25]，其中电站 1 为不完全多年调节水库，电站 3 为季调节水库，都具备一定的调节能力，在实时调度的计算时段内水位变化较小；电站 2 为引水径流式电站，不具备调节

能力，可按实际入流进行计算。

表 1 梯级电站参数表

Tab.1 Parameter table of cascade power stations

项目	电站 1	电站 2	电站 3
正常蓄水位/m	1 420	1 233.9	955
死水位/m	1 380	-	933.5
汛限水位/m	1 419.5	1 233.9	955
防洪高水位/m	1 420.03	-	-
设计洪水水位/m	1 420.05	1 236.3	956.56
校核洪水水位/m	1 422.19	1 236.4	957.86
防洪库容/($\times 10^8$ m ³)	0.25	-	1.15
调洪库容/($\times 10^8$ m ³)	1.5	-	0.306
总库容/($\times 10^8$ m ³)	25.3	0.008	2.07
死库容/($\times 10^8$ m ³)	8.8	-	0.61
大坝设计洪水/(m ³ ·s ⁻¹)	1 426 (P=0.2%)	1 055 (P=2%)	1 965.1 (P=0.2%)
大坝校核洪水/(m ³ ·s ⁻¹)	2 230 (P=20.01%)	1 131 (P=0.33%)	2 244 (P=0.02%)
电站形式	坝后式	引水式	坝后式
厂房设计洪水/(m ³ ·s ⁻¹)	1 083	-	1 523
厂房校核洪水/(m ³ ·s ⁻¹)	1 426	-	1 965.1
调节类型	不完全多年调节	无调节能力	季调节
库容系数	0.46	-	0.0285
机组台数	4	4	4
装机容量/(MW)	500	240	240

采用上述优化算法，使用流域梯级电站 2022 年 10 月 1 日实际发电和入流资料为例进行站间负荷分配模拟。流域梯级站间短期负荷分配情况如图 3 所示，从图中可以看出，为提高梯级运行水头，电站 1 作为上游且具备不完全多年调节能力的电站需增加负荷，电站 2 作为径流式电站并根据实际入流进行计算，电站 3 的出库流量应兼顾下游用水需求和水库水位。

3.2.2 实时优化

选取 2022 年 10 月 1 日流域梯级实际运行数据，以早上 8:00 后的 15 min 时段为例进行梯级实时负荷优化分配计算。截止前一时段即 8:15 时刻，电站 1、2、3 在早上 8:00 运行的水头分别为 130.66、185.22、84.84 m。到第 36 时段，电网下达负荷增加指令，

梯级出力由原计划的 500 MW 增加至 526 MW，此时需要调整三站出力以满足梯级负荷变动需求。

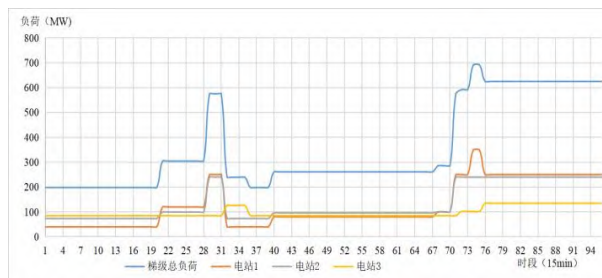


图 3 流域梯级日计划负荷站间优化分配图

Fig.2 Optimization distribution diagram of daily planned load between stations in watershed cascades

根据前文的梯级实时负荷分配方法进行计算，得到的分配结果见表 3。表 3 与表 2 的该时段实际负荷分配情况进行对比，在积分电量相同的情况下，优化算法比实际负荷分配耗用的水能少 4 090.84 kW·h，该结果表明实时优化调度负荷分配实现了在单时段降低能耗损失的目的，提升了梯级发电效益。

表 2 流域梯级单时段实际负荷分配情况表

Tab.2 Table of actual load distribution in single period of basin cascade

项目	初始出力/(MW)	给定出力/(MW)	水头/(m)	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	积分电量/(kW·h)	耗能/(kW·h)
电站 1	175	201	130.65	173.6	50 250	55 615.42
电站 2	190	190	185.22	118.8	47 500	53 920.44
电站 3	135	135	84.84	193.5	33 750	40 245.15
梯级	500	526	-	-	131 500	149 781.01

表 3 流域梯级单时段负荷优化分配情况表

Tab.3 Table of optimal load distribution in single period of basin cascade

项目	初始出力/(MW)	给定出力/(MW)	水头/(m)	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	积分电量/(kW·h)	耗能/(kW·h)
电站 1	175	173	130.65	148	43 349	47 308.54
电站 2	190	240	185.15	148	60 000	67 176.49
电站 3	135	113	84.86	150	28 151	31 205.14
梯级	500	526	-	-	131 500	145 690.17

4 结论

1) 本文针对日计划下的流域梯级负荷分配问题，分析了短期优化调度特性，并指出短期优化调度中日调度的特点，构建了以梯级消耗水位势能最小为目标的日计划梯级电站负荷分配模型，提出了

基于电站投入顺序的动态规划算法来求解模型,再结合水电站站内负荷优化分配方法,实现了基于日计划的流域梯级负荷优化分配问题的求解。

2)分析了日计划下的梯级电站优化分配求解存在的不足,提出使用基于水量电力平衡的梯级实时调度模型来解决流域梯级实时调度中的求解问题,验证了日发电计划的合理性。

3)通过选取某流域梯级电站典型日和时段运行数据进行算例分析,结果表明,在积分电量相同的情况下,优化算法比实际负荷分配耗用的水能少4 090.84 kW·h。本文提出的模型和算法可以在满足既定约束的前提下,有效降低梯级电站发电耗能,提升梯级发电效益,具有一定的工程实践指导意义。

参考文献:

- [1] 朱法华,王玉山,徐振,等.中国电力行业碳达峰、碳中和的发展路径研究[J].电力科技与环保,2021,37(3):9-16.
ZHU Fahua, WANG Yushan, XU Zhen, et al. Research on the development path of carbon peaking and carbon neutrality in China's power industry[J]. Power Technology and Environmental Protection, 2021,37(3): 9-16.
- [2] 孙新德.国内外水电站优化调度研究综述[J].华中电力,1994(6):25-28.
SUN Xinde. Overview of research on optimal operation of hydropower stations at home and abroad[J]. Central China Electric Power, 1994(6): 25-28.
- [3] 过夏明,秦毓毅,魏少岩.节能发电调度下的水电短期优化调度[J].电力系统及其自动化学报,2010,22(1):138-141.
GUO Xiaming, QIN Yuyi, WEI Shaoyan. Short term optimal scheduling of hydropower under energy-saving power generation scheduling[J]. Journal of Power System and Automation, 2010,22(1): 138-141.
- [4] 路志宏,阮喜珍,卢本捷,等.三峡梯级水库日优化调度模型及应用[J].水电自动化与大坝监测,2003(4):58-60.
LU Zhihong, RUAN Xizhen, LU Benjie, et al. Daily optimal operation model and application of Three Gorges cascade reservoirs[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2003(4): 58-60
- [5] 郭富强,郭生练,刘攀,等.清江梯级水电站实时负荷分配模型研究[J].水力发电学报,2011,30(1):5-11.
GUO Fuqiang, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Research on real-time load distribution model of Qingjiang cascade hydropower station[J]. Journal of Hydroelectric Power, 2011,30(1):5-11.
- [6] 葛晓琳,张粒子,王春丽.多目标短期梯级水电优化调度混合整数模型[J].电力系统保护与控制,2013,41(4):55-60.
GE Xiaolin, ZHANG Zizi, WANG Chunli. Multi objective short-term cascade hydropower optimal dispatching mixed integer model[J]. Power System Protection and Control, 2013,41(4):55-60.
- [7] 徐东斌.复杂约束下梯级水电站短期优化调度模型研究[D].大连:大连理工大学,2022.
XU Dongbin. Research on short-term optimal operation model of cascade hydropower stations under complex constraints[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2022.
- [8] 王旭,雷晓辉,蒋云钟,等.基于可行空间搜索遗传算法的水库调度图优化[J].水利学报,2013,44(1):26-34.
WANG Xu, LEI Xiaohui, JIANG Yunzhong, et al. Reservoir scheduling map optimization based on feasible spatial search genetic algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(1):26-34.
- [9] 冯雁敏,李承军,张雪源.基于改进粒子群算法梯级水电站短期优化调度研究[J].水力发电,2009,35(4):24-28.
FENG Yanmin, LI Chengjun, ZHANG Xueyuan. Research on short-term optimal scheduling of cascade hydropower station based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Water Power, 2009,35(4):24-28.
- [10] 古家平,马光文,黄炜斌,等.梯级水电站短期优化调度算法研究[J].水力发电,2013,39(12):61-64.
GU Jiaping, MA Guangwen, HUANG Weibin, et al. Research on short-term optimal scheduling algorithms for cascade hydropower stations[J]. Water Power, 2013,39(12): 61-64.
- [11] 张高峰,郑浩,刘双全,等.适应不同优化模型的水电梯级系统短期调度算法[J].电网技术,2020,44(1):230-237.
ZHANG Gaofeng, ZHENG Hao, LIU Shuangquan, et al. Short term scheduling algorithm for water elevator level systems adapted to different optimization models[J]. Power Grid Technology, 2020,44(1): 230-237.
- [12] 李鹏.水电站经济运行中调度软件的编写以及研究[D].武汉:华中科技大学,2005.
LI Peng. Compilation and research of dispatching software in economic operation of hydropower station[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [13] 郭富强.梯级水电站实时优化调度与经济运行[D].武汉:武汉大学,2010.
GUO Fuqiang. Real time optimal dispatching and economic operation of cascade hydropower stations [D]. Wuhan:Wuhan University, 2010.
- [14] 杜亮,杨韵.电网日发电计划合理性评估指标研究[J].电工电气,2019(7):65-68.
DU Liang, YANG Yun. Research on rationality evaluation index of daily power generation plan[J]. China Electrical Engineering,2019(7):65-68.
- [15] 杜晓勇,李岩,刘轶,等.基于AGC的日发电计划在线调整、执行与评估策略[J].电气技术,2013(4):57-60.
DU Xiaoyong, LI Yan, LIU Yi, et al. Online adjustment, implementation and evaluation strategy of daily generation plan based on AGC[J]. Electric Technology,2013(4):57-60.
- [16] 廖昕宇,朱旭萍,田武慧.提高小浪底电站发电效益分析[J].水利科技与经济,2014,20(10):100-102.
LIAO Xinyu, ZHU Xuping, TIAN Wuhui. Analysis on improving the power efficiency of Xiaolangdi Hydropower Station[J]. Water Science and Economics,2014,20(10):100-102.

- [17] 陈佳,伍永刚,胡斌奇,等.改进的梯级负荷分配耗能最小模型[J].电力系统自动化,2017,41(10):155-160.
CHEN Jia, WU Yonggang, HU Binqi, et al. Improved energy consumption minimization model for cascade load distribution[J]. Power System Automation, 2017,41(10):155-160.
- [18] 蒋致乐,郑凯,易瑞吉,等.基于实测异型混流式水电机组优化运行[J].电力科技与环保, 2022,38(3):175-183.
JIANG Zhile, ZHENG Kai, YI Ruiji, et al. Optimal operation of special type mixed-flow hydropower unit based on measurement[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2022,38(3):175-183. (in Chinese)
- [19] 冯仲恺.水电系统中长期优化调度降维方法研究[D].大连:大连理工大学,2016.
FENG Zhongkai. Study on dimensionality reduction method of medium and long term optimal dispatching of hydropower system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [20] 冯仲恺,牛文静,程春田,等.大规模水电系统优化调度维数灾问题研究进展[J].水电与抽水蓄能,2021,7(5):111-115.
FENG Zhongkai, NIU Wenjing, CHENG Chuntian, et al. Research progress on the dimensionality disaster problem of large-scale hydropower system optimization scheduling[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021,7(5): 111-115.
- [21] 郑凯,蒋致乐.水电站不同运行模式下站内负荷优化分配研究[J].大电机技术,2022,283(4):81-88.
ZHENG Kai, JIANG Zhile. Research on optimal load distribution of hydropower station under different operation modes[J]. Large Electric Machine Technology, 2022(4):81-88.
- [22] 魏兴波.梯级水电站日发电计划优化研究与应用[D].武汉:华中科技大学,2012.
WEI Xingbo. Research and application on daily generation plan optimization of cascade hydropower station[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [23] 张培,邓盛名.水电机组调速器提高一次调频响应合格率方法[J].水电能源科学,2019,37(12):117-120+69.
ZHANG Pei, DENG Shengming. Method for improving the qualification rate of primary frequency modulation response of hydroelectric unit governors[J]. Hydroelectric Energy Science, 2019,37(12):117-120+69.
- [24] 王铁禹,马世俊,皮俊波,等.关于国调直调电厂“两个细则”的讨论[J].电力系统自动化,2018,42(16):174-179+186.
WANG Yiyu, MA Shijun, PI Junbo, et al. Discussion on "Two Detailed Rules" of the state tie-controlled power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42(16):174-179+186.
- [25] 郎永媛,钟德钰,孟长青.基于梯级水库调节系数的径流调节能力分析[J].青海大学学报,2020,38(4):44-53.
LANG Yongyuan, ZHONG Deyu, MENG Changqing. Analysis of run off regulation capacity based on cascade reservoir regulation coefficient[J]. Journal of Qinghai University, 2020,38(4): 44-53.

第一作者简介:郑凯(1989-),男,工程师,主要从事水电厂控制系统技术监督、技术咨询、试验的研究。E-mail: 12024635@ccic.com.cn