

巨型水轮发电机组发电水头配置方法研究

王仲昌 栾俊 刘杰 许利文 刘邓

中国长江电力股份有限公司, 中国·云南 昆明 650000

摘要: 如何保障水轮发电机组发电水头的有效合理是水电优化调度的重点问题。为此, 提出集控中心与电站现场水位测量装置双重冗余配置方式, 发电水头计算值合理性判断方法及实际取值优先级策略, 并提出发电水头异常时, 程序一键解锁方法。最后以金沙江下游大型水电站为研究对象进行验证。通过对比分析, 充分说明了该方法的可行性、先进性, 相对于传统的水头配置方法, 能充分保障水轮发电机组发电水头的可靠性, 减轻运行调度人员的调控压力, 对水电站优化调度发展有一定的促进作用。

关键词: 水电站; 发电水头; 闭锁水头; 配置方法; 闭锁逻辑

Research on the Method of Generating Head Configuration for Giant Hydroelectric Generating Units

Zhongchang Wang Jun Luan Jie Liu Liwen Xu Deng Liu

China Yangtze River Electric Power Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract: How to ensure the effective and reasonable generation head of hydropower units is a key issue in optimizing hydropower scheduling. To this end, a dual redundant configuration method is proposed for the centralized control center and on-site water level measurement device of the power station, as well as a method for judging the rationality of the calculated value of the power generation head and a priority strategy for the actual value. In addition, a one click unlocking method for the program is proposed when the power generation head is abnormal. Finally, the large-scale hydropower station in the lower reaches of the Jinsha River was taken as the research object for verification. Through comparative analysis, the feasibility and progressiveness of this method are fully explained. Compared with the traditional head allocation method, it can fully guarantee the reliability of the generating head of hydropower units, reduce the regulation pressure of the operation and dispatching personnel, and promote the development of optimal dispatching of hydropower stations.

Keywords: hydropower station; generation head; locking head; configuration method; locking logic

0 前言

水电是中国能源体系的重要组成部分, 随着装机容量的持续增长, 水电机组的运行效率已成为行业关注的重点, 发电水头作为水电站的核心参数, 直接影响水轮机的输出性能与稳定性。利用以出库流量作为输入因子的下游水位经验递推方法, 计算水头偏差, 在水头偏差分析的基础上, 给出了利用水头偏差可能产生的经济效益。通过解析水头与河道流量的关联性, 为水电开发提供理论依据, 结合中小型水电站的技术条件, 按水头发电的实际要求, 提出一种新的适用于中小型水电站的按水头发电控制算法。上述研究针对发电水头的可靠性及有效性方面研究较少, 目前水电站发电水头基本存在计算水头配置单一、闭锁逻辑不够完善、解锁方式烦琐等情况, 当水位采集装置故障、传输异常、系统崩溃等因素导致水头故障后便直接闭锁水头, 保持其值不变直至水头恢复, 这将导致水电机组使用的水头值与实际水头值存在较大的偏差, 进而影响水电机组的发电运行。此外, 故障恢复后需人工逐次调整数据以逼近真实值, 操作烦琐且依赖主观判断。

为提升发电水头的有效性与调控智能化水平, 论文提

出一种水电机组水头冗余配置及闭锁优化方法, 更充分保障发电水头的有效性、合理性, 减轻运行调度人员的调控压力。一种完善的水电机组发电水头配置方法及闭锁逻辑为亟待解决的问题, 为此论文提出了一种水电机组发电水头配置的方法, 以克服现存不足。解决上述问题, 充分保障发电水头的有效性、合理性, 保证发电机组正常运行。

1 水电机组发电水头配置方法

论文从三个方面阐述了水电机组发电水头配置方法, 包括水头冗余配置的计算、有效水头的计算策略以及水头异常的处理方法, 具体内容如下。

1.1 计算水头冗余配置

水电站的水头计算采用冗余设计, 通过两套互为备份的水位测量装置采集数据, 并综合计算得出结果, 含集控水头 H_j 、电站水头 H_d 及手动设值 3 种。

集控水头公式:

$$H_j = (h_{js} - h_{jzw}) + (h_{j上} - h_{jyw}) / 2$$

其中: h_{js} 为集控上游代表水位, h_{jzw} 为集控左岸尾水位, h_{jyw} 为集控右岸尾水位。

电站水头公式:

$$H_d = (h_{zd} - h_{zdw}) + (h_{yd} - h_{ydw}) / 2$$

其中: h_{zd} 为左岸电站坝前水位, h_{yd} 为右岸电站坝前水位, h_{zdw} 为左岸电站尾水位, h_{ydw} 为右岸电站尾水位。

1.2 有效水头计算策略

计算水头遵循优先级顺序原则, 即: 集控水头 $H_j >$ 电站水头 $H_d >$ 手动设置。

监控系统间隔 Δt , 采集时间点 t 对应的水位数据, 依据水头计算公式得出当前时刻 t 的计算水头值, 随后对该值进行合理性验证:

$$|H_{js(t)} - H_{js(t-\Delta t)}| < \Delta h$$

式中: 当前时刻 t 计算水头值为 $H_{js(t)}$, 上一时刻对应的有效水头值为 $H_{js(t-\Delta t)}$, 水头变化阈值为 Δh 。

若上述不等式成立, 则将当前时刻 t 计算水头 $H_{js(t)}$ 视为有效计算范围, 并以 t 时刻邻近的 X 个合理水头值的均值作为 t 时刻的有效水头; 反之, 则 t 时刻的有效水头值维持不变, 沿用 $t-\Delta t$ 时刻有效水头; 若连续 n 个 Δt 间隔的计算水头 H_{js} 均不符合条件, 则发出警报并闭锁该水头, 系统将自动切换至次优先级的计算水头。

集控与电站水头 H_j 、 H_d 均出现异常情况被闭锁后, 系统将根据优先级排序规则自动切换至手动设定模式以确定计算水头。此时, 系统会定期间隔 $\Delta t'$ 调取电站上游库区邻近监测点的数据, 包含: 入库流量、出库流量等, 以及水头闭锁前最后记录的正常水库水位数据。运用水量平衡原理、水位与库容的对应关系曲线图以及尾水位与流量关系曲线, 系统将推算出水头估算值。此估算值经人工审核判定确认后, 方可作为有效水头值发布。此外, 操作人员也可直接手动输入数值作为有效水头值。若无人工干预, 系统将维持现有水头值不变。

发电水头计算流程见图 1 所示。

1.3 水头异常处置方法

在仅集控水头或仅电站水头遭遇闭锁的情况下, 一旦故障水头恢复正常且缺失数据得到补充录入后, 操作人员需手动触发解锁指令。系统将自动评估解锁条件, 若条件齐备, 则解锁操作得以执行, 系统依据预设优先级, 自动将计算水头切换至更高级的水头数据源。倘若条件未达标准, 系统将拒绝解锁请求, 并发起警报以提示操作人员。

仅集控水头闭锁时, 解锁判定条件为:

$$|H_{j(t)} - H_{yx(t)}| < \Delta h$$

其中: 解锁时刻集控水头值 $H_{j(t)}$, 解锁时刻电站有效水头值 $H_{yx(t)}$, 水头变化阈 Δh ;

仅电站水头闭锁时, 解锁判定条件为:

$$|H_{d(t)} - H_{yx(t)}| < \Delta h$$

式中: 解锁时刻电站水头值 $H_{d(t)}$, 解锁时刻电站有效水头值 $H_{yx(t)}$, 水头变化阈值 Δh 。

当集控水头与电站水头均处于闭锁状态, 则计算水头依赖于手动设置时, 若其中一种故障水头率先恢复并完成数据补全时, 需人工手动启动解锁程序。解锁过程采用逐步逼近的方式, 系统按照预设的解锁步长 $\Delta h'$ 且 $(\Delta h' < \Delta h)$ (即每次调整的幅度), 每隔时间 ΔT 对有效水头进行赋值, 赋值方向始终朝向逐步接近故障恢复水头值的方向。此过程持续进行, 直至有效水头值与故障恢复水头值之间的差小于设定的水头变化阈值 Δh , 此时故障恢复水头成功解锁。随后, 系统依据优先级顺序, 自动将计算水头切换至该已恢复的水头。对于另一种故障水头的恢复, 其解锁流程与单一水头闭锁时的解锁方法相同, 即按照前文所述的仅集控水头或仅电站水头闭锁时的解锁步骤执行。

系统设计有自动与手动两种操作模式, 默认运行于自动模式。当操作人员切换至手动模式后, 可根据需要手动将计算水头切换至任意优先级的水头。发电水头的具体解锁流程可参考图 2 所示的示意图。

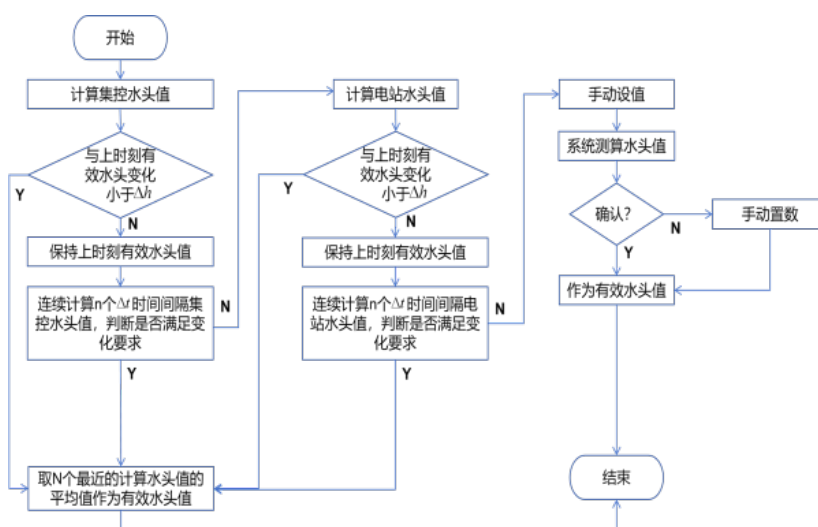


图 1 发电水头计算流程图

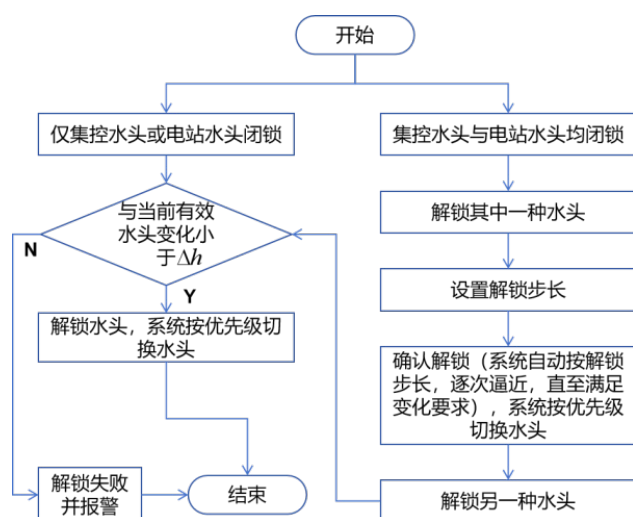


图 2 发电水头解锁流程图

2 工程实例分析

2.1 对比分析水头配置与计算策略

传统方法通常仅依赖单一的集控侧水头或电站侧水头，缺乏双重冗余配置，导致系统的可靠性较低。此外，传统方法未设计相应的计算策略，无法实现不同水头之间的自动切换，灵活性不足。

以金沙江下游某大型水电站为例，论文提出的方法采用了冗余配置的计算水头方案，包括集控水头 H_j 、电站水头 H_d 以及手动设定值三种来源，如图 3 所示。该系统同时支持自动和手动两种运行模式，默认情况下以自动模式运行。当操作人员切换至手动模式后，可根据实际需求手动将计算水头切换至任意优先级的水头来源，从而显著提升了系统的可靠性和灵活性。

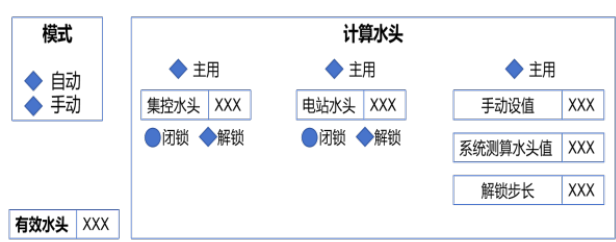


图 3 发电水头画面设计图

如图 1 所示流程，监控系统每 5 分钟采集一次当前时刻 t 的水位测量数据，并通过水头计算公式得出当前时刻 t 的计算水头值，随后对该值进行合理性验证：若其符合预设的合理范围，则将其纳入有效水头计算；若不符合，则将其排除，并保持当前有效水头值不变。若连续多个时间间隔的计算水头值均未通过合理性验证，系统将锁定该水头并发出警报，同时按照优先级顺序切换至次一级水头作为计算依据。

$$|H_{js(t)} - H_{yx(t-\Delta t)}| < 1$$

式中： $H_{js(t)}$ 为当前时刻 t 计算水头值， $H_{yx(t-\Delta t)}$ 为上一时刻有效水头值，水头变化阈值为 1 米。

若不等式成立，则将当前计算水头值纳入有效水头计算范围，并取当前时刻 t 最近的 10 个合理计算水头值的平均值作为 t 时刻的有效水头值；若不等式不成立，则 $H_{js(t)}$ 不纳入有效水头计算， t 时刻的有效水头值保持为前一时刻的有效水头值。若连续 n 个 5min 间隔的计算水头值 H_{js} 均不满足上述不等式条件，则系统会锁定该水头并触发报警提示，同时按照优先级顺序切换至次一级水头作为计算水头来源。这一机制确保了水头数据的可靠性和系统的稳定性。

2.2 水头异常处置对比分析

传统方法在发电水头出现异常时，通常直接闭锁水头并等待人工处理故障后再解锁。这一过程较为复杂，需要操作人员手动逐步调整水头值，使其逼近实际值以完成解锁。若故障处理时间较长，锁定的水头值可能与实际值产生较大偏差，从而直接影响水发电机组的稳定运行。

论文提出的方法在发电水头异常时，能够提供水头预测值，确保水头数据的可靠性。同时，该方法还提供了一键解锁功能，简化了发电水头闭锁后的解锁流程，显著减轻了操作人员的工作负担。具体而言，系统会根据预设的解锁步长，自动逐步调整水头值，使其逼近实际值，直至满足解锁条件。这一改进不仅提高了系统的自动化水平，还增强了水发电机组运行的稳定性和效率。具体如下。

当电站水头 H_d 与集控水头 H_j 均因异常情况被闭锁后，系统会自动将计算水头切换至手动设定模式。同时，系统会每隔 15 分钟采集一次水电站上游库区邻近监测点的流量数据 Q_{lj} 、水电站的出库流量数据 Q_{ck} ，以及在水头异常锁定前最后一刻记录的水库正常水位值 H_d 。这些数据将用于后续的水头估算和故障恢复操作。

根据水位库容曲线及水库正常水位值 H_d ，可以计算出水电站水位每小时变化 1 厘米所需的流量数据 ΔQ 。同时，利用尾水位 - 流量关系曲线及出库流量 Q_{ck} ，可以确定当前的尾水位值 h_w 。基于水量平衡原理，结合采集到的上游库区流量、出库流量以及水位变化数据，系统能够计算出 15 分钟的水库水位变幅：

$$\Delta h_{st} = \frac{Q_{lj} - Q_{ck}}{\Delta Q} \times \frac{15}{60}$$

由上系统估算出水头值：

$$H_{st} = H_{zk} + \Delta h_{st} - h_w$$

经人工审核确认后，估算或设定的水头值可作为有效水头值正式下发。此外，操作人员也可直接手动输入数值并发布为有效水头值。若未进行人工干预，系统将维持当前有效水头值不变，避免因数据缺失导致计算中断。

如图 2 所示流程，集控水头与电站水头均闭锁，计算水头为手动设定，电站水头先恢复并完成故障数据补数时，需人工手动一键解锁；解锁步长为 0.9 米，系统自动按解锁

步长每隔 30 秒赋值给有效水头,赋值方向为逐次逼近电站水头值的方向,直至有效水头值与电站水头值差值小于水头变化阈值 1m,电站水头解锁,系统按优先级顺序,将计算水头自动切换为该水头;当集控水头再恢复并完成故障数据补数时,需人工手动一键解锁,系统自动判定解锁条件是否满足,若满足,则解锁成功,系统按优先级顺序,将计算水头自动切换为高一级水头,若不满足,则系统拒绝执行解锁指令并报警提示。

3 结语

论文提出了一种水电机组发电水头配置方法,主要结论如下:

①水头配置方法及闭锁逻辑:提出了水电机组发电水头的合理配置方法及闭锁逻辑,确保水头数据的可靠性、有效性和合理性。通过双重冗余配置和自动切换机制,显著提升了系统的稳定性和灵活性。

②一键解锁方法:设计了水头故障闭锁后的一键解锁功能,能够更智能、更安全地解锁水头,减少了传统方法中烦琐的人工操作。解锁过程采用逐步逼近的方式,确保水头值平稳过渡,避免对机组运行造成冲击。

③故障时的水头测算功能:该方法具备故障情况下的水头测算能力,能够为调度人员提供水头预测值,辅助其在水头故障时分析判断实际水头值。这一功能有效减轻了调度值班员的工作压力,提高了故障处理的效率和准确性。

综上所述,论文提出的方法不仅优化了水头配置和闭锁逻辑,还通过智能化解锁和水头测算功能,显著提升了水电机组运行的可靠性和调度管理的便捷性。

参考文献:

- [1] 张玉胜,李爱云,赵雪花,等.考虑非汛期库水位动态控制的水-光互补中短期调度研究[J/OL].水电能源科学,1-6[2024-11-18].
<https://doi.org/10.20040/j.cnki.1000-7709.2024.20232198>
- [2] 徐伟,葛勇,仲委,等.洪家渡水电站综合出力系数率定研究[J].水电能源科学,2023,41(6):192-196.
- [3] 高峰,郑南轩,向科.基于水头偏差的葛洲坝水电站经济效益分析[J].水力发电,2013,39(5):69-71+83.
- [4] 陈集梅.冲乎尔水电站发电水头的利用问题[J].中国水利,2013(2):47-48.
- [5] 王云杰,廖常初,陈晓东,等.中小型水电站按水头发电控制算法及其实现[J].水电能源科学,2007(1):59-62.
- [6] 刘邓,郑林祥,董彦,等.基于不蓄电能最大化的梯级水电站优化调度研究[J].中国农村水利水电,2023(6):280-285.
- [7] 俞洪杰,纪昌明,张验科,等.反调节作用下的梯级水库短期优化调度研究[J].人民长江,2019,50(5):185-190.
- [8] 王战策,谢小平,曹光明.龙羊峡水库径流调节作用及效益分析[J].人民黄河,2017,39(1):14-17.
- [9] 李峰,雷明慧,马旭东,等.某水电站尾水渠体型优化试验研究[J].水电能源科学,2016,34(9):107-109.
- [10] 郭宇,吴俊杰.新疆布仑口超高水头钢管岔管参数化设计及优化分析[J].水电能源科学,2019,37(4):96-99.
- [11] 林志强,王雨雨,王宗志,等.龙江水电站动态出力系数计算及其合理性分析[J].水电能源科学,2014,32(2):64-67.

作者简介:王仲昌(1986-),男,高级工程师,从事水电站运行调度管理研究。

基金项目:中国长江电力股份有限公司科研项目(项目编号:Z542302007)。