

Economic Operation Analysis of a Large Hydropower Station Unit

Shiqiang Huang

Yalong River Hydropower Development Company Ltd., Chengdu, Sichuan, 610051, China

Abstract

The power generation water consumption rate serves as a key indicator for evaluating the economic performance of hydropower stations, with primary influencing factors including generating head, unit output, and vibration zones. This study theoretically analyzes the determinants of water consumption rates, integrating operational constraints such as power station start-stop cycles and load distribution. By defining the objective function as minimizing comprehensive water consumption rates across different heads, the research investigates optimal start-stop strategies and load allocation methods under varying loads to enhance operational efficiency. A large-scale hydropower station with a total installed capacity of 3,300 MW, equipped with six Francis turbine generators (550MW each), operates within a head range of 135m to 189m and a rated head of 165m. As a critical grid component for power generation and peak regulation, its economic performance directly impacts both the station's profitability and water resource utilization efficiency.

Keywords

Water consumption rate; Power generation head; Economic Operation

某大型水电站机组经济运行分析

黄世强

雅砻江流域水电开发有限公司, 中国·四川成都 610051

摘要

发电耗水率是衡量水电站经济运行情况的重要指标, 主要影响因素有发电水头、机组出力、振动区等。本文从理论上分析耗水率的影响因素, 结合电站开停机及机组负荷分配限制因素, 以不同水头下机组综合耗水率最小为目标函数, 研究不同负荷下机组开停机及负荷分配方式, 提高机组经济运行水平, 某大型水电站总装机容量3300MW, 装有6台单机容量550MW的混流式水轮发电机组, 运行水头范围为135m~189m、额定水头165m。在电网中承担重要发电与调峰任务。其经济运行水平直接影响电站效益与水资源利用效率。

关键词

发电耗水率; 发电水头; 经济运行

1 引言

为提升运行经济性、降低发电成本, 本研究基于电站多年实际运行数据, 在满足电网发电与安全要求的约束下, 聚焦于厂内经济运行的核心优化问题: 一是寻求最优机组运行台数组合, 即在给定全厂总负荷下确定最经济的并网机组数量; 二是实现机组间负荷最优分配, 即在运行机组间合理分配具体负荷。这两方面决策共同决定了电站的综合耗水率(每发一度电的耗水量), 这是衡量水能转化效率的关键指标。

研究旨在通过分析水头、负荷、振动区及机组效率等因素对耗水率的综合影响规律, 构建一套实用的经济运行优

化策略, 为运行决策提供支持, 最终实现在保障安全可靠的前提下, 最小化发电耗水率, 提升电站整体经济效益。

2 发电水头因素分析

机组耗水率是指水轮发电机组发出单位电量所消耗的水量, 其表达式如下:

$$\mu = \text{发电水量} / \text{发电流量} = Q \cdot T / (N \cdot T) = C / (H \cdot \eta)$$

式中: Q 为发电用水量, m^3/s ; H 为发电水头, m ; N 为机组出力, kW ; η 为机组效率; 为时间, s ; C 为耗水率, $\text{m}^3/(\text{kW} \cdot \text{h})$; 为常数 ($C=3600/9.81$)。

由上式可以看出, 影响水轮发电机组耗水率的主要因素是水轮发电机组的水头和效率, 根据电站水轮机运转特性曲线(如图1所示), 可知水轮机效率随水头升高而提高, 因此提高机组发电水头可降低机组耗水率^[1]。

【作者简介】黄世强(1991-), 男, 中国陕西略阳人, 本科, 工程师, 从事水电站运行管理研究。

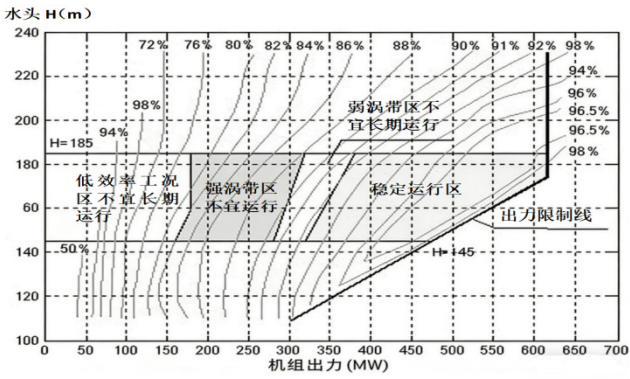


图1 水轮机运转特性曲线图

3 机组出力因素分析

根据电站实际运行发电耗水率历史数据，得出机组耗水率与出力的关系曲线（如图2所示）。

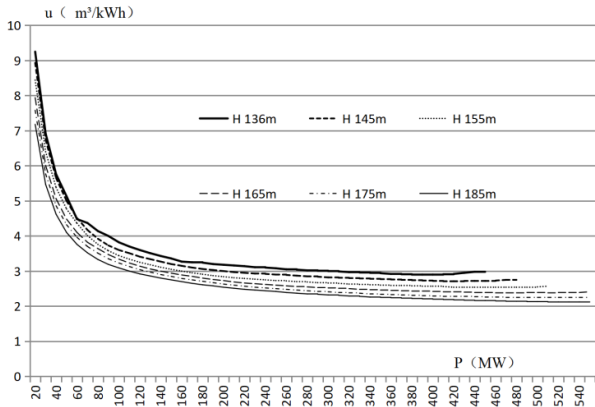


图2 机组发电耗水率与出力及水头关系曲线图

由图2可知，在发电水头不变的情况下，机组耗水率随机组出力增加而降低，这主要得益于水轮机在高效区运行，能量转换效率显著提升。然而，在振动区下沿的工况尤其值得关注：当出力降低进入该区域时，机组内部流态恶化，水力损失剧增，导致耗水率随出力减少而急剧上升；当机组接近空载运行时，其耗水率甚至可高达额定负荷时的5~6倍，这意味着在极低负荷下发电的水能浪费极为严重。因此，从单机运行角度看，尽可能保持机组在较高负荷区间运行，是降低其耗水率最直接有效的途径。此外，通过对比图中不同水头下的曲线簇可以清晰看出，在相同出力条件下，较高的发电水头能显著降低耗水率，这揭示了提升运行水头与优化负荷水平具有同等重要的节能价值。在实际调度中，需统筹考虑这两方面因素，以达成最优经济运行状态^[2]。

4 振动区因素分析

电站机组的振动区受水头影响，因水头不同，振动区下沿在150MW-180MW间变化，振动区上沿在360MW-460MW间变化，绘制机组振动区与水头关系曲线（如图3所示）。

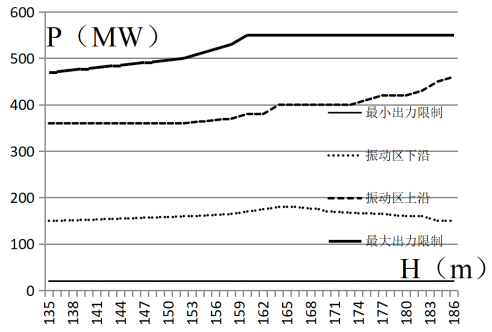


图3 机组振动区与水头关系曲线图

由于机组不允许在振动区长期运行，而且电站机组振动区跨度较大，机组在振动区以上高负荷区运行时，效率高，耗水率低；机组在振动区以下低负荷区运行时，效率低，耗水率高。理论上尽量保证并网机组在高负荷区运行，可有效降低机组整体耗水率，但由于电网对机组旋转备用以及调压需要，经常会出现多台机组在低负荷区运行的情况，从而导致全站机组综合耗水率升高^[3]。

5 并网机组台数因素分析

以180m水头为例，通过分析同一负荷不同并网机组台数运行方式下机组综合耗水率的高低，研究机组并网台数对机组经济运行的影响。查询历史运行数据，得到180m水头下并网机组台数与机组综合耗水率的关系曲线图（如图4所示）。

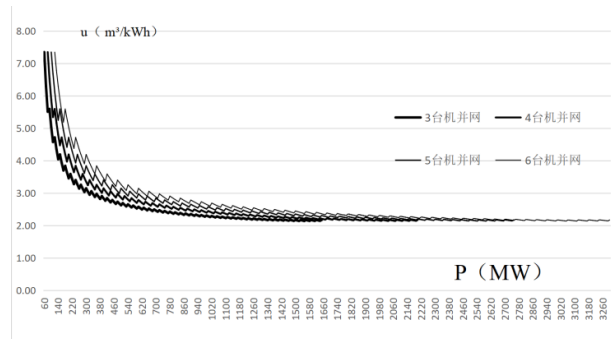


图4 并网机组台数与耗水率关系曲线图

从图4可以看出，在发电水头一定、全厂总出力一定的条件下，机组综合耗水率主要取决于并网运行的机组数量。一般而言，并网机组台数越少，平均每台机组的负荷率越高，机组往往能运行在更高效的水轮机运转区，因此综合耗水率也越低。然而，在实际运行中，这一优化过程受到振动区与电网电压稳定性的双重制约。

由于水轮机水力运转特性的限制，机组在特定负荷区间（即振动区）运行会引起设备振动加剧，威胁安全稳定，因此该负荷段必须避开。尤其在电站处于高水头工况（例如水头大于180m）时，机组振动区范围较宽。以182m水头为例，振动区覆盖160MW~430MW，而单机出

力范围在 20MW 至 550MW 之间。此时若全厂总负荷处于 1260MW ~ 1290MW 区间，理论上三台机组满负荷运行即可满足需求，但由于每台机需承担 420MW 左右的负荷，正好落入振动区内，导致负荷无法安全分配。为确保出力与调度计划一致，电站不得不增开第四台机组，使各机负荷远离振动区，但也因此降低了机组平均负荷率，导致综合耗水率上升。

此外，从电网安全运行角度考虑，并网机组数量也与电压稳定性密切相关。历史运行数据表明，当电站并网机组少于 4 台时，系统电压及厂用电电压容易出现偏低现象，难以满足调压要求。为维持电压在合格范围内，也需要增加并网机组以提供必要的无功支撑，这同样会促使机组在偏离最优效率点的工况下运行，进一步推高综合耗水率^[4]。

因此，电站运行不仅要考虑耗水率这一经济指标，还必须兼顾机组安全振动约束与电网电压稳定需求。在实际调度中，往往需要在节水运行与安全、电压稳定之间寻求平衡，通过合理规划开机台数与负荷分配，实现安全、经济与电网要求的协同优化。

6 机组负荷分配因素分析

同样以 180m 水头为例，通过分析同一负荷相同并网机组台数不同负荷分配方式下机组综合耗水率的高低，研究机组负荷分配对机组经济运行的影响。查询电站历史运行数据，得到 180m 下全站总出力相同并网机组台数相同，机组不同负荷分配方式下机组综合耗水率数据，见表 1。

表 1 180m 水头下机组综合耗水率列表
(总出力: MW, 耗水率: kWh/m³)

总出力	并网台数	1F	2F	3F	4F	5F	6F	综合耗水率
1000	6	420	96	96	96	96	96	2.63
1000	6	420	420	40	40	40	40	2.63
1500	6	430	430	160	160	160	160	2.38
1500	6	420	420	420	80	80	80	2.38
2000	6	420	420	420	420	160	160	2.26
2000	6	507	507	507	160	160	160	2.26
2500	6	468	468	468	468	468	160	2.19
2500	6	545	545	545	545	160	160	2.19

从表 1 数据可以看出全厂总出力不变并网机组台数不变的情况下，机组综合耗水率与并网机组负荷分配情况无关。由此可以看出电站当前站内 AGC 程序按等耗量微增率最优经济分配投入 AGC 机组的负荷，并不能明显起到提高机组经济运行水平的作用，同时按当前 AGC 负荷分配原则，还容易出现机组运行在振动区边缘的情况，使机组运行工况

不佳，不利于机组安全稳定运行^[4]。

7 结论

(1) 通过优化流域水库调度，合理蓄水与科学泄流，持续抬高机组运行水头，可直接降低机组综合耗水率。这是从源头上提升水能转换效率的关键举措，能最大程度地利用流域水能资源，实现发电效益的整体提升。因此，应将水库调度优化作为一项常态化、精细化的工作来开展。

(2) 在满足电网旋转备用容量、系统调压需求及厂用电安全可靠的前提下，运行决策应优先考虑减少并网机组台数。这一策略能促使运行机组处于较高负荷率区间，逼近最优效率点，从而有效降低全厂综合耗水率，是提升电站经济运行水平的核心操作原则。但实施时需谨慎评估安全边界。

(3) 在编制日发电计划与负荷曲线时，应有意识地规避“三台机不可分配的负荷段”。计划阶段的前瞻性规避，能够从源头避免因负荷落入振动区而被迫临时增开机组的被动局面，防止由此导致的耗水率非必要升高，保障既定经济运营目标的实现。

(4) 为减少外部约束，可积极探索硬件改造方案。例如，研究在厂用电系统加装动态无功补偿装置（如 SVC、SVG）或自动调压设备。该措施旨在确保仅有三台机并网时，厂用电电压质量仍能稳定达标。若能实现，将显著拓宽三台机安全稳定运行的负荷范围，在满足全厂出力要求的前提下，为更多地采用高效率的三台机组合运行模式创造条件，从而持续降低综合耗水率。

(5) 电站内部的自动化控制系统，特别是站内 AGC 的负荷分配逻辑，存在持续优化的空间。未来的研究应致力于，在既定并网台数下，使 AGC 的分配算法不仅能满足总负荷指令，更能智能地将各机组负荷引导至振动区之外的高效平稳区。这将在不损失经济性的同时，显著改善机组运行工况，延长设备寿命，实现安全与经济效益的双重优化。

参考文献

- [1] 陈飞翔. 二滩水电站机组经济运行组合方式研究. 华东电力, 2011, 39(10):1747-1750
- [2] 杨东. 二滩水轮机综合特性曲线及真机最优工况研究. 机电技术, 2011年第6期:51-52.
- [3] 张雪源, 王蔚然, 沈学东. 关于水电厂经济运行的研究. 东北电力技术, 1999年第一期:36-38.
- [4] 邹林, 王义. 浅谈水电站机组经济运行的措. 水利科技, 2015年第15期:203.
- [5] 姚仁民, 卫东辉, 王好锋. 三门峡水电站经济运行与分析. 人民黄河, 2011, 39(7):15-18.