

抽水蓄能电站运行效率与能源消耗分析

姚浩晨, 张景辉, 王祖飞

(河南天池抽水蓄能有限公司, 河南 南阳 473000)

摘要 研究抽水蓄能电站的运行效率与能源消耗对于提升能源利用效率、降低环境影响具有重要意义。运行效率的高低直接影响电站的经济性和可持续性, 而能源消耗的优化则有助于减少能源浪费和提高能源使用效率。本文首先定义了抽水蓄能电站的运行效率和能源消耗, 并探讨了影响效率和消耗的主要因素, 如水泵和水轮机的性能、输电损耗、系统控制与调度等。随后, 提出了提高运行效率和减少能源消耗的技术和措施, 包括采用先进的水泵水轮机技术、智能电网与优化调度系统、高效能水泵及输电设备、先进的储能技术以及优化运行调度策略。通过这些措施, 以期可以为有效提升抽水蓄能电站的整体性能、促进能源的高效利用和环境的可持续发展提供参考。

关键词 抽水蓄能电站; 运行效率; 能源消耗

中图分类号: TV7

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)09-0004-03

在全球能源转型和应对气候变化的背景下, 抽水蓄能电站作为一种重要的储能方式, 在平衡电网负荷、提高新能源发电消纳能力方面发挥着关键作用。然而, 电站的运行效率和能源消耗直接影响其经济性和环境效益。因此, 深入研究抽水蓄能电站的运行效率与能源消耗, 探索提高效率 and 减少消耗的技术和措施, 对于推动能源结构优化和实现绿色低碳发展具有重要的现实意义。

1 研究抽水蓄能电站运行效率与能源消耗的意义

研究抽水蓄能电站运行效率及能源消耗问题, 不仅影响电站本身的经济性及可持续性, 同时对促进能源结构优化及实现绿色发展也起着举足轻重的作用。一是提高运行效率可以显著减少电站能源消耗和化石能源依赖程度, 进而减少碳排放并为应对全球气候变化做出贡献。二是优化能源消耗可以促进电站经济效益提高, 并通过减少能源浪费、提高能源使用效率、降低运营成本等措施来提高电站市场竞争力。

2 抽水蓄能电站的运行效率

2.1 运行效率的定义及计算方法

抽水蓄能电站的运行效率是指电站在抽水和发电过程中能量转换的有效程度, 通常用效率百分比来表示。具体来说, 运行效率可以通过能量的输入输出比值来衡量。运行效率的计算方法主要涉及两个方面: 抽水效率和发电效率。抽水效率是指在抽水过程中, 电能转换为势能的效率; 发电效率则是指在发电过程中, 势能转换为电能的效率。整个抽水蓄能电站的总效率是这两部分效率的乘积。计算公式为: 总效率 = 抽水效率 ×

发电效率。例如, 如果抽水效率为80%, 发电效率为90%, 则总效率为 $0.8 \times 0.9 = 0.72$, 即72%。影响运行效率的因素包括机械设备的性能、系统设计的合理性、运行条件的稳定性及环境因素等。高效的机械设备和合理的系统设计能够显著提高运行效率, 而不稳定的运行条件和不利的环境因素则可能导致效率降低^[1]。为了准确评估抽水蓄能电站的运行效率, 通常需要综合考虑各个环节的能量转换情况, 通过详细的数据测量和分析, 得出具体的效率值。提高运行效率不仅可以减少能源消耗, 还能提高经济效益和环境效益, 是抽水蓄能电站运行管理中的重要目标。

2.2 影响运行效率的主要因素

2.2.1 水泵和水轮机的性能

水泵是用来从低位水库向高位水库取水的, 水泵性能的好坏直接影响抽水时能量损失。效率高的泵能量转换效率高, 可以在同等电能输入的情况下提取更多的水分, 降低了能量损耗。同时水轮机在高位水库水势能向电能转化中的应用也同样具有十分重要的意义。高效水轮机可以使水流势能最大化, 降低能量损失和提高发电量。水泵与水轮机性能的好坏不仅取决于它们的设计与制造过程, 而且受运行维护等因素的影响。

2.2.2 输电损耗

在电能的传输过程中, 由于导线的电阻和其他电气元件的阻抗, 会产生一定的能量损失, 这部分损失通常以热能的形式散发出来。输电损耗与输电线路的长度、导线的材料和截面积、流经电流的大小以及输电电压等因素密切相关。长距离输电线路会增加电阻,

导致更大的能量损失；导电性能不佳的材料和较小的截面积会增加电阻；较大的电流同样会增加损耗。因此，采用高导电性能的材料、适当加大导线截面积、优化输电线路布局以及采用高压输电技术是减少输电损耗的有效手段。

2.2.3 系统控制与调度

有效的系统控制能使抽水与发电过程达到最佳状态，并保证能量以最佳时间与状态转化。现代抽水蓄能电站一般都是利用先进的自动化控制系统对水位、电力需求、设备状态进行实时监控并动态调节优化运行。合理调度策略能够保证电站电力需求低谷时段抽水储能、电力需求高峰时段发电供电，以提高整体效率。在调度时，需综合考虑电网负荷变化、市场电价波动和电站本身运行状况。利用如遗传算法和粒子群优化这样的智能调度方法，我们能够更为高效地确定最佳的调度策略。系统控制及调度也需紧密配合电网运行及调度中心，以保证电站运行和电网需求之间的高度和谐^[2]。

2.3 提高运行效率的技术和措施

2.3.1 先进的水泵水轮机技术

提高抽水蓄能电站效益的重要手段之一，就是采用水泵、水轮机等先进技术。其中包括设计与制造工艺效率高，材料应用创新性强，智能控制系统等。在现代水泵和水轮机的设计过程中，流体动力学的优化被高度重视，通过运用计算流体动力学（CFD）模拟技术来改进叶片的形态和流道设计，从而有效地降低水流的阻力和能量损耗。高强度合金、复合材料等高性能材料的使用不仅使装备耐磨性、抗腐蚀性增强，而且可以在较高压、较高转速条件下平稳工作。另外，引入磁悬浮轴承技术还能降低机械摩擦损耗和提高装置能量转换效率。智能控制系统能够通过实时监测和调整水泵和水轮机的运行参数，例如转速、压力和流量，确保设备始终保持在最佳的工作状态。变频调速技术，自动化控制以及远程监测技术等多种技术综合应用使水泵以及水轮机运行更灵活、更有效。

2.3.2 智能电网与优化调度系统

智能电网通过集成先进的传感、通信和控制技术，实现电力系统的实时监测和动态调节。智能电网可以有效地管理电力供应和需求，优化电力资源的分配，从而提高电网的整体效率和稳定性。优化调度系统则通过先进的算法和模型，制定最优的发电和抽水计划，确保电站在电力需求高峰时发电，在需求低谷时抽水储能。这些系统利用大数据分析和人工智能技术，综合考虑电力市场价格、负荷预测、电站设备状态等多

种因素，动态调整电站的运行策略。智能电网与优化调度系统的结合，不仅提高了抽水蓄能电站的运行效率，还增强了电网的灵活性和可靠性^[3]。例如，通过预测电力需求高峰，优化调度系统可以提前调度电站进行抽水储能，确保在需求高峰时能够提供足够的电力供应。

2.3.3 维护与管理策略

定期的维护和检修可以确保设备始终处于最佳工作状态，防止因磨损、腐蚀和故障导致的效率下降。建立完善的设备维护计划，包括定期检查、预防性维护和故障排查，可以及时发现和解决潜在问题，延长设备的使用寿命。现代维护策略中，预测性维护逐渐成为主流，通过监测设备运行数据，如振动、温度、压力等，利用大数据分析和机器学习算法，预测设备的故障趋势，提前进行维护，避免突发故障导致的停机 and 效率损失。管理策略方面，优化运行管理流程，提升操作人员的技能水平，实施严格的质量控制体系，都是提高运行效率的重要措施。采用信息化管理系统，如设备管理系统（EAM）和企业资源计划系统（ERP），可以实现设备运行状态的实时监控、维护记录的自动化管理和资源的高效配置。

3 抽水蓄能电站的能源消耗

3.1 影响能源消耗的主要因素

3.1.1 水泵效率

水泵效率是水泵在把电能转化为机械能，最后用来增强水势能时，能量转化是否有效。高效水泵可以实现更大抽水量而电能消耗更少，进而降低整体能源消耗。泵的效率受到很多因素的影响，主要有设计、材质、运行条件和维护状况等。在现代水泵设计中，通常会运用流体动力学（CFD）的优化技术来调整叶轮和壳体的外形，目的是降低流体的阻力和涡流造成的损失。另外，采用高强度耐腐蚀材料制作水泵部件还可以提高效率和寿命。改变水头高度、流量等操作条件对水泵效率也有影响，保持工作点处于最佳状态是保证高效率的一个关键。定期对水泵进行检修及清洗，避免叶轮及流道内杂质堆积，同时还可以有效地维持高效率运行。

3.1.2 电力传输效率

电力传输效率是指在电力从电源传输到负载过程中所保留的电能比例，直接影响抽水蓄能电站的整体能源消耗。高效的电力传输系统能够将更多的电能输送至水泵和水轮机，从而减少电能在传输过程中的损失。电力传输效率受电缆的电阻、电压等级、变压器

效率等多种因素的影响。使用低电阻率的导线材料如铜或铝、优化电缆截面、采用高电压传输方式，均能有效降低电能损耗。

3.1.3 系统运行模式

不同的运行模式决定了电站在抽水和发电阶段的能量调度和管理策略，从而影响整体能耗。通常，抽水蓄能电站运行模式包括固定时段运行、负荷跟踪运行和市场优化运行等。固定时段运行模式是在预定的时间段内进行抽水和发电，适用于电力需求相对稳定的情况，但可能无法充分利用电价波动和负荷变化带来的优化机会。负荷跟踪运行模式根据电网实时负荷变化进行动态调整，能够更好地匹配电力供应和需求，减少不必要的能量损失。市场优化运行模式则根据电力市场价格信号进行调度，在电价低谷时抽水储能，高峰时发电出售，从经济角度优化能源利用。

3.2 减少能源消耗的技术和措施

3.2.1 高效能水泵及输电设备

在降低抽水蓄能电站能源消耗中，使用高效能水泵及输电设备是关键。高效能水泵的设计与制造采用了低阻力涂层、叶轮优化设计及高精度加工工艺等先进材料与工艺，使水泵工作效率显著提高，降低能量损耗。另外，现代水泵一般都装有智能控制系统，能够根据实际需要对工作参数进行动态调节，进一步提升能效。对输电设备进行优化同样是至关重要的环节。传统输电线路因电阻、电感效应造成能量损耗大，新型超导材料及高压直流输电技术使输电损耗显著减小^[4]。高压直流输电（HVDC）技术在长途输电应用中表现出了明显的优越性，它不仅降低了电能传输过程中的损失，还有助于增强电网的稳定性和可靠性。

3.2.2 先进的储能技术

先进的储能技术对降低抽水蓄能电站能源消耗具有关键作用。伴随着科学技术的发展，多种新型储能技术层出不穷，给电力系统带来了更有效、更灵活的解决方案。首先要明确的是，锂离子电池作为一项已经成熟的储能方法，因其较高的能量密度和出色的充放电性能，已经在多种规模的储能项目中得到了广泛的应用。它的快速响应、长寿命等特性使电力系统可以更灵活地调整电力供需、降低能源浪费。其次，液流电池（如钒液流电池）凭借其独特的电解液存储方式，可以实现大规模储能，且循环寿命长、安全性高，适用于大型电网储能。另外，压缩空气储能（CAES）技术与飞轮储能技术已渐趋成熟，前一种技术是通过把电能转换成压缩空气存储起来，必要时再放空带动发电机产生电能；后者是利用电动机的加速飞轮来贮

存动能，必要时放能产生电能。其耐久性、环境友好性等特点，使这些技术具有大规模储能的潜能。更为关键的是，通过引进智能储能管理系统，并运用先进的计算方法与数据分析手段，能够对储能设备进行更高效的调度，从而提升整体的能源效率。

3.2.3 优化运行调度策略

优化运行调度策略是减少抽水蓄能电站能源消耗的重要手段之一。通过科学合理的调度策略，能够有效平衡电力供需，提升系统整体能效。基于大数据和人工智能技术的智能调度系统，可以实时监测电力需求和供给情况，动态调整抽水和发电的时机。例如，在电力需求低谷期，可通过大数据预测未来电力需求，提前安排抽水蓄能操作，将多余电能储存起来；而在电力需求高峰期，则及时释放蓄能，满足电网负荷需求，减少因电力不足而导致的紧急启动火电机组等高能耗设备的情况^[5]。优化调度策略还包括多能源互补调度，通过与风能、太阳能等可再生能源的联合调度，充分利用不同能源的互补特性。例如，在风力发电富余时，可以协同抽水蓄能电站进行抽水储能，而在风力不足时，则通过释放水能发电，平衡电网的供需。

4 结束语

通过对抽水蓄能电站运行效率与能源消耗的研究，我们认识到提升效率和降低消耗对于电站的可持续发展至关重要。通过采用先进的水泵水轮机技术、智能电网与优化调度系统、高效能水泵及输电设备、先进的储能技术以及优化运行调度策略，可以显著提高抽水蓄能电站的运行效率，减少能源消耗，从而促进能源的高效利用和环境的可持续发展。未来，随着技术的不断进步和管理的持续优化，抽水蓄能电站将在能源转型和环境保护中扮演更加重要的角色。

参考文献：

- [1] 马喜峰,朱海波.抽水蓄能电站上水库运行条件下冰厚数值模拟研究[J].东北水利水电,2023,41(02):46-48,72.
- [2] 刘轩,杨铭轩,吴昊,等.抽水蓄能电站运行工况数字化动态规划模型分析[J].中国高科技,2024(10):52-54.
- [3] 孙宏.抽水蓄能电站运行管理实践及运维一体化[J].电工材料,2024(01):54-56.
- [4] 景小兵,姜里运,许闫.某抽水蓄能电站机组运行稳定性分析[J].东北电力技术,2024,45(02):50-53,57.
- [5] 汪哲斌,杨威嘉,杨小龙,等.变速抽水蓄能机组功率优先控制模式的运行稳定域分析[J].水电与抽水蓄能,2024,10(01):24-29,92.