

# 新型抽水蓄能技术的研发与应用前景

周立波

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

**摘要:** 在全球能源转型与新型电力系统建设需求下,新型抽水蓄能技术凭借技术创新成为储能领域的关键突破点。本文系统梳理了超高水头机组、变速机组、智能建造与运维、多能互补等核心研发方向,揭示其通过材料升级、控制优化与系统集成实现效率提升与成本降低的技术路径。应用前景方面,新型技术将通过技术融合创新、特殊环境适应性开发、数字化与智能化转型以及多能互补体系构建,推动抽水蓄能从单一储能向综合能源服务转型,为可再生能源大规模消纳与电网安全稳定运行提供关键支撑,助力全球能源低碳化进程。

**关键词:** 新型抽水蓄能技术;研发方向;应用前景

**引言:** 随着全球可再生能源装机占比突破40%,风电、光伏发电的间歇性与波动性对电网调峰能力提出严峻挑战。传统抽水蓄能技术虽为成熟储能方案,但受限于水头高度、机组调节速度及建设周期等因素,难以满足新型电力系统对灵活性、响应速度及经济性的复合需求。在此背景下,新型抽水蓄能技术通过超高水头设计、变速机组控制、智能建造工艺及多能互补集成等创新路径,突破传统技术瓶颈,形成覆盖设备制造、工程建设与系统运维的全链条技术体系。其研发与应用不仅可提升能源系统调节能力,更将推动储能行业向高效化、智能化、生态化方向演进,成为构建清洁低碳能源体系的核心技术支撑。

## 1 新型抽水蓄能技术概述

新型抽水蓄能技术是在传统抽水蓄能基础上,通过技术创新与系统优化形成的先进储能解决方案,其核心目标在于提升能源转换效率、增强系统调节能力并降低全生命周期成本。(1) 新型技术突破了传统水头限制。传统抽水蓄能电站水头多在300-600米之间,而超高水头技术通过高强度材料与精密水力设计,将额定水头提升至700米以上,单机容量突破400兆瓦。例如,某项目采用1000兆帕级高强度水电钢,使上水库大坝高度增加30%,单位储能容量成本降低15%,同时通过优化转轮叶片形状,将水力效率提升至92%,显著提升了能量转换效率。(2) 机组调节灵活性实现质的飞跃。变速机组技术通过交流励磁系统实现功率的秒级响应,突破了传统定速机组“非抽即发”的单一模式。在新能源占比超40%的电网中,变速机组可根据实时负荷需求,在0-100%额定功率范围内连续调节,既能在光伏大发时快速抽水储能,又可在用电高峰精准补足电力缺口,将系统调峰能力提升40%以上。(3) 智能化与生态化成为技术升级新方向。智

能建造技术融合BIM建模与北斗定位系统,实现混凝土浇筑精度达毫米级,施工周期缩短20%;运维环节通过数字孪生技术构建虚拟电站,实时模拟设备状态,故障预测准确率超90%。同时,生态友好型设计如严寒地区抗冰冻结构、清水混凝土工艺等,使电站与自然深度融合,推动储能技术从“功能实现”向“价值创造”转型<sup>[1]</sup>。

## 2 新型抽水蓄能技术的研发进展

### 2.1 超高水头抽水蓄能技术

超高水头抽水蓄能技术是当前抽水蓄能领域的前沿方向,其核心在于通过提升水头高度实现能量密度与转换效率的突破。该技术突破了传统600米级水头的限制,向700米级甚至800米级迈进,为抽水蓄能电站的规模化、高效化发展开辟了新路径。(1) 超高水头技术显著提升了工程综合效益。以阳江抽水蓄能电站为例,其799米级水头设计使单机容量达400兆瓦,单位储能容量成本较传统电站降低15%。通过采用1000兆帕级高强度水电钢与优化水力设计,转轮效率提升至92%,水力稳定性达到国际领先水平。这种技术突破不仅减少了上下水库的库容需求,还降低了混凝土用量与施工周期,实现了经济效益与工程效率的双重提升。(2) 超高水头技术推动了关键材料的创新应用。为应对高压水道对围岩稳定性的挑战,国内研发了限裂透水钢筋混凝土衬砌结构,结合高压灌浆工艺,使800米级水道建设成为可能。例如,阳江电站通过分阶段灌浆与围岩加固技术,成功解决了超高水头下管道变形与渗漏问题,为后续项目提供了成熟的技术范式。(3) 超高水头技术促进了机组设计的革命性进步。针对高水头工况,国内企业开发了长短叶片转轮与双馈变速机组,可有效适应水头动态变化,提升机组运行稳定性。以浙江天台电站为例,其724米级水头、425兆瓦单机容量机组采用6长6短叶片设计,解决了超长引水系

统过渡过程复杂的问题,水力稳定性在同水头段机组中达到最优水平。

## 2.2 变速机组抽水蓄能技术

变速机组抽水蓄能技术是突破传统定速机组局限的关键创新,通过引入交流励磁系统实现机组功率的灵活调节,显著提升了抽水蓄能电站对电网的支撑能力。该技术以动态响应为核心,重新定义了储能设备在新型电力系统中的角色。(1)变速机组实现了功率的连续双向调节。传统定速机组只能在“抽水”或“发电”两种模式间切换,而变速机组通过调节转子励磁电流,可在0-100%额定功率范围内无级变速运行。例如,在光伏大发时段,机组可快速从发电模式切换至抽水模式,并精准控制抽水功率以匹配新能源出力波动;在用电高峰,又能以变速运行填补电网缺口,将系统调峰响应速度从分钟级提升至秒级,有效缓解了新能源间歇性对电网的冲击。(2)变速技术显著提升了机组运行效率。通过优化转子磁极结构与控制算法,变速机组在部分负荷工况下仍能保持高效率运行。以某400兆瓦变速机组为例,其抽水工况综合效率达91%,较定速机组提升3%;发电工况效率突破95%,且在20%-100%负荷区间内效率波动小于2%,实现了全工况高效运行。(3)变速机组推动了控制策略的智能化升级。结合数字孪生与人工智能技术,变速机组可实时模拟电网频率、电压变化,自动调整运行参数。例如,在频率波动场景中,机组能在100毫秒内完成功率调节,较传统机组响应速度提升5倍,为电网提供了类似“虚拟同步机”的惯性支撑,显著增强了电力系统的抗干扰能力。

## 2.3 智能建造与运维技术

智能建造与运维技术通过融合数字化工具、物联网与人工智能算法,重构了抽水蓄能电站从建设到运营的全生命周期管理模式,成为提升工程效率、降低运维成本的核心驱动力。(1)智能建造技术实现了施工过程的精准化与自动化。基于BIM(建筑信息模型)的三维设计平台,可将地质勘探数据、设备参数与施工工艺集成至统一模型,通过仿真分析优化大坝结构、隧洞走向等关键设计。施工阶段,北斗定位系统与激光扫描技术结合,实现混凝土浇筑、锚杆打设的毫米级精度控制,减少返工率。同时,自动化设备如智能浇筑机器人、无人驾驶运输车的引入,使人工干预减少60%以上,单日混凝土浇筑量提升40%,显著缩短建设周期。(2)智能运维技术构建了设备状态的实时感知与预测维护体系。通过在机组、变压器等核心设备部署多类型传感器,系统可持续采集温度、振动、压力等关键参数,结合边缘计算模块实现

数据就地处理,避免信息延迟。机器学习算法对历史故障数据进行训练,可识别设备运行中的异常模式,提前3-7天预警潜在故障,将非计划停机时间减少50%。此外,AR(增强现实)技术辅助远程诊断,专家可通过实时画面指导现场检修,缩短故障排除时间。(3)数字孪生技术推动了运维决策的智能化转型。通过构建电站的虚拟镜像,运维人员可在数字空间模拟不同工况下的设备响应,优化检修策略与运行参数。例如,在汛期模拟中,系统可分析水库水位变化对大坝稳定性的影响,自动生成加固方案;在负荷波动场景中,数字孪生体可实时调整机组出力,确保运行效率始终处于最优区间,使电站综合能效提升5%-8%。

## 2.4 多能互补抽水蓄能技术

多能互补抽水蓄能技术通过整合多种能源形式与储能方式,构建了灵活、高效、可持续的复合能源系统,成为应对新能源波动性、提升能源综合利用率的关键解决方案。其核心在于打破单一储能模式的局限,实现不同能源间的优势互补与协同优化。(1)该技术实现了电-热-冷-气多能流的协同转换。抽水蓄能电站通过配置电锅炉、热泵等设备,可将富余电能转化为热能储存于蓄热装置中,在供暖季或工业用热需求高峰时释放,形成“电热联供”模式。同时,结合压缩空气储能或氢能储能系统,电站可将低谷电能用于压缩空气或电解水制氢,实现跨季节、跨领域的能量存储与释放,使能源利用效率提升20%以上。(2)多能互补技术增强了系统对新能源的消纳能力。在风光资源丰富但用电负荷低的地区,抽水蓄能电站可与光伏、风电场联合运行,通过实时监测新能源出力波动,动态调整抽水/发电功率。当光伏发电过剩时,电站优先抽水储能;当风电不足时,电站快速发电补足缺口,形成“风光水储”一体化调度体系,将新能源弃电率控制在5%以内,显著提升可再生能源的利用率。(3)该技术推动了能源供应的稳定性与经济性平衡。通过配置不同时间尺度的储能单元(如分钟级电池储能、小时级抽水蓄能、日级氢能储能),系统可灵活应对秒级频率波动、小时级负荷变化及日级能源供需失衡。这种分层储能架构不仅降低了对单一储能技术的依赖,还通过优化不同储能方式的充放电策略,使全生命周期成本降低15%-20%,为能源系统提供了更具韧性的运行方案<sup>[2]</sup>。

## 3 新型抽水蓄能技术的应用前景

### 3.1 技术融合创新

新型抽水蓄能技术正通过与先进能源技术的深度融合,推动储能系统向高效化、多功能化演进。一方面,

与液流电池、固态电池等电化学储能技术的结合,可构建“抽水蓄能+化学储能”的混合储能系统,利用抽水蓄能的大容量、长周期优势与化学储能的快速响应特性,实现秒级至天级的全尺度功率调节,提升电网对新能源波动的适应性。另一方面,与氢能技术的融合成为新方向,通过将低谷电能用于电解水制氢,结合抽水蓄能的水库作为氢能储运载体,形成“电-氢-水”耦合的能源网络,既解决了氢能存储难题,又拓展了抽水蓄能的应用场景。

### 3.2 特殊环境适应性技术

针对极端气候与复杂地理条件,新型抽水蓄能技术通过材料创新与结构优化,显著提升了环境适应性。在严寒地区,研发抗冻混凝土与电伴热系统,确保水库大坝在-40℃低温下不发生冻胀破坏;采用耐低温润滑材料与加热装置,保障机组在极寒环境中稳定启动。在高原地区,通过优化转轮水力设计,解决低气压导致的汽蚀问题,使机组在海拔4000米以上仍能保持90%以上的效率。针对沿海高盐雾环境,开发耐腐蚀涂层与密封技术,延长设备使用寿命至30年以上。此外,模块化设计与预制装配技术,使电站可快速部署于山地、岛屿等偏远地区,降低对地形条件的依赖,推动抽水蓄能技术向更广泛的地理区域延伸。

### 3.3 数字化与智能化

数字化与智能化技术正深度赋能抽水蓄能电站,实现从设备控制到系统调度的全面升级。通过部署物联网传感器与5G通信网络,电站可实时采集机组振动、温度、水位等1000余项参数,结合边缘计算实现数据就地处理,降低延迟。人工智能算法对历史运行数据进行训练,可预测设备故障风险,提前3-7天发出预警,将非计划停机时间减少50%以上。数字孪生技术构建电站的虚拟镜像,运维人员可在数字空间模拟不同工况下的设备响应,优化检修策略与运行参数,使电站综合能效提升5%-8%。此外,智能调度系统通过与电网、新能源发电场的实时数据交互,可自动调整抽水/发电功率,实现与风光发电的

精准匹配,提升整个能源系统的协同运行能力。

### 3.4 多能互补体系构建

新型抽水蓄能技术通过与其他能源形式的深度耦合,构建了多能互补的能源供应体系。在区域能源系统中,抽水蓄能电站可与光伏、风电、生物质能等联合运行,形成“风光水储生物质”一体化微网。当新能源发电过剩时,电站优先抽水储能,同时将富余电能用于生物质气化或制氢;当新能源不足时,电站快速发电补足缺口,生物质能作为基础负荷保障供应稳定性。在城市能源体系中,结合热泵、电锅炉等设备,电站可实现“电热冷”三联供,将低谷电能转化为热能或冷能储存,满足建筑用能需求。此外,通过与电动汽车充电网络的联动,电站可在用电低谷时为车辆充电,高峰时利用车辆电池储能参与电网调峰,形成“车网互动”的智能能源网络,推动能源系统向清洁化、灵活化方向转型<sup>[3]</sup>。

### 结束语

新型抽水蓄能技术正以技术融合、环境适应与智能化为核心,推动储能产业向高效、灵活、低碳方向加速转型。变速机组、海水抽蓄等创新技术突破了传统调峰边界,AI与数字孪生技术则重构了全生命周期管理范式。随着全球能源结构向高比例新能源转型,抽水蓄能作为“压舱石”的角色愈发凸显。未来,通过持续技术迭代与跨领域协同,新型抽水蓄能技术将深度融入新型电力系统,为全球能源革命提供更具韧性、经济性和可持续性的解决方案。

### 参考文献:

- [1]吴燕.新型电力系统场景下抽水蓄能的应用探讨[J].电器工业,2022(06):61-64.
- [2]王磊,魏敏.新型电力系统场景下抽水蓄能的应用探讨[J].水电与抽水蓄能,2021,7(06):15-16+23.
- [3]葛军强,魏春雷,胡清娟,张林.抽水蓄能电站设备智能化关键技术及发展趋势分析[J].水电与抽水蓄能,2021,5(04):15-17+26.