

# 混合式抽水蓄能开发的特点与问题探讨

陈锐意<sup>1</sup> 黄桂兵<sup>2</sup> 马宇<sup>1</sup>

1. 贵州黔源电力股份有限公司 贵州贵阳 550000;

2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司 贵州贵阳 550081

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17683

**[摘要]** 混合式抽水蓄能电站通常指的是在已有的常规水电站基础上,通过增建或改造,使其具备抽水蓄能功能。可以依托遍布全国的成千上万座现有水库,为不同地区提供了可行的储能解决方案。此类电站的水头一般不高,大多在几十米到100多米之间。我国已建成混合式抽水蓄能电站的有岗南、潘家口、响洪甸、白山等水电站,在建的混合式抽水蓄能电站有两河口、古田溪、乌溪江、紧水滩、梨园-阿海,前期开展工作的有龙羊峡、安康、光马等。近年抽水蓄能发展迅猛,但混合式抽水蓄能电站因在政策层面上限制因素较多,导致推进较为困难。

**[关键词]** 混合式抽水蓄能,多能协调,多元挑战

## 一、混合式抽水蓄能电站的特点

混合式抽水蓄能电站通过利用已建上/下水库的储存调蓄作用,增加了常规机组的发电调峰容量。通过蓄能机组和常规机组联合运行,提高了水库泄流能力,有利于水库的防洪调度。将汛期弃水及灌溉等综合利用任务的下泄水量进行发电,提高电站的水能利用率。混合式抽水蓄能的特点可以概括为“依托现有、灵活高效、一站多能”。

### 1.1 盘活存量资产,实现绿色升级

当前,我国大量常规水电站已运行多年,普遍面临功能单一、设备老化、经济效益持续下滑的发展困境。混合式抽水蓄能电站的改造模式,为这些老电站的转型升级提供了创新路径。该模式的核心优势在于,能够充分利用既有水电站的现有基础设施——包括大坝、水库(可作为上水库或下水库)、引水系统、发电厂房以及电力送出线路等,实现对存量资产的深度盘活与价值重塑。

通过增建抽水系统并进行机电改造,老旧的常规水电站得以从单一的“发电”功能,转型升级为“发电+储能”一体化的综合能源服务中心。这一转变不仅显著拓展了其业务范围,更极大地提升了资产的全生命周期价值与市场盈利能力,使其焕发出新的生机。该模式在资源节约与生态友好方面展现出显著价值。它有效规避了为新建纯抽水蓄能电站所需开发两个水库而引发的大规模土地征用与淹没损失,最大限度地减少了对流域生态环境的再次扰动与破坏。这种立足于现有工程基础的深度开发模式,大幅提升了水能资源的利用效率,是对土地空间和自然环境的更为友好的集约化开发典范,

高度契合新时代绿色、可持续发展的理念,为水电行业的存量资产优化与高质量发展提供了重要方向。

### 1.2 降本增效,建设提速

工程具备投资成本低廉、建设进程迅速的显著优势。在已建工程的设计与施工阶段,针对工程区域的地质条件,我们开展了详尽的勘探工作,并结合施工实际进行了多次复核,使得工程地质状况清晰明了。这一举措为混合式抽水蓄能电站的投资控制提供了坚实保障,确保了投资的可控与合理。

同时,该工程充分利用了大量既有设施,特别是上下水库资源,以及前期工程中已构建的对外交通网络、场内交通体系和施工场地。这不仅大幅削减了工程费用,还有效降低了施工期间的临时性支出,进一步压缩了工程投资总额。在已建工程周边实施阶段,受影响的移民群体及相关建筑物已提前完成搬迁工作,管理区域内的土地性质相对单一明确。这极大地减轻了征地移民工作的复杂度和投资规模,为工程初期的快速推进创造了有利条件。得益于这些前期准备,工程的筹建期得以显著缩短,整体建设周期也随之大幅缩减,展现了高效的建设速度与卓越的成本控制能力。

### 1.3 角色升级,功能多元

功能定位全面拓展,实现从单一“电源”向“电源+储能”的华丽转身。如今,电站的角色发生了根本性变革,它宛如一位灵活的“电力舞者”,在来水充沛时尽情发电,将水能转化为源源不断的电能;而在电力富余之际,又能巧妙地抽水储能,实现“发电”与“用电”功能的无缝切换。

除了常规的发电任务,电站的服务能力更是实现了质的

飞跃。它如同电网的“贴心管家”，能够为电网提供一系列优质辅助服务，包括精准的调峰、填谷，快速的调频、调相，以及可靠的旋转备用等，全方位满足电网的多样化需求，摇身一变成为电网不可或缺的“多功能服务节点”。并且对于那些上下水库库容较大的混合式抽水蓄能电站而言，它们更是具备强大的长周期调节能力，能够实现周调节、月调节。在新能源遭遇异常气候，出力不足的困境时，这些电站就像坚实的后盾，为新能源提供有力支撑，确保电力供应的稳定与可靠，为能源系统的平稳运行保驾护航。

#### 1.4 一体化协同的核心

系统集成协同化 多能互补的核心：非常适合作为“水风光储一体化”基地的核心调节器，实现多能互补，打造综合能源基地。它可以作为核心，将周边的风电、光伏基地紧密耦合起来，能够平抑风光电力的剧烈波动，通过其卓越的调节能力，将不稳定的风光资源转化为稳定、可靠的绿色电力，打捆输送至负荷中心，提升整个能源基地的外送电质量和经济价值，形成“水风光储”一体化的清洁能源基地。在梯级水电站中引入混合式抽蓄，可以改变下游电站的来水过程，优化全流域的水量分配和能量调度，增加流域调度灵活性，实现“时空再分配”。

#### 1.5 运营高效，成本占优

运行灵活，成本低：在运营时可以利用常规水电站现有办公场所，常规水电站采用一套人员运行维护，仅需增加少量运行人员即可满足运行维护需求，年运行成本相比纯抽水蓄能电站，有着明显的优势。

## 二、混合式抽水蓄能电站存在的问题

尽管优势突出，但其开发和运营也面临一系列技术、经济、政策和环境方面的挑战。

### 2.1 站点筛选严，影响评估难

混合式抽水蓄能电站的开发面临的首要挑战是资源识别与评估难题，其站点筛选过程极为复杂。并非所有已建成的常规水电站都具备改造条件，需要进行全面且精细的综合评估。这包括对站点的水头高低、上下库有效库容及距离、区域地形地质条件的适宜性、现有水工建筑物及发电设备的老化状态与改造潜力、以及电网接入点的容量与稳定性等一系列关键因素进行严格论证。找到一个在技术、经济和环境层面都高度匹配的优质站点，难度非常大。

此外，改造带来的生态环境影响评估同样复杂且严峻。

抽水工况的引入将根本性改变原有的水库水流自然模式和下游河道的水文情势。这种改变会引发一系列连锁反应，需要精确预测和评估其对水库水温分层结构、库区泥沙淤积规律与速率、水体富营养化及水质、以及为维持下游水生态系统稳定所必须保障的生态流量等方面产生的复杂影响。这一系列严峻的挑战，使得项目前期工作的深度、广度和成本显著增加，成为项目决策的首要关卡。

### 2.2 集成与运行的双重挑战

技术集成与优化运行挑战 机组选型复杂。是选择可逆式水泵水轮机（四机合一，紧凑但工况范围窄）还是独立水泵与水轮发电机组（运行灵活但投资高、布置复杂），需要根据具体站址条件和运行需求进行深入的技术经济比较。调度运行复杂，电站的运行状态在“发电”、“抽水”、“停机”和“调相”之间频繁切换，其调度指令需要同时考虑来水预报、电力市场价格、电网实时需求、水库运行约束等多重目标，优化调度算法的复杂性远高于常规水电站。抽水时巨大的电力需求可能会对当地的电网造成冲击，需要对接入系统的稳定性进行重新评估和加固。

### 2.3 经济效益高度依赖市场机制

经济性与市场机制方面潜藏着一定风险，其中电价机制是核心要点。混合式抽水蓄能电站的经济效益，在很大程度上取决于峰谷电价差的大小。若峰谷电价差过小，其“低买高卖”的运营套利模式所获取的收益，将难以覆盖电站日常的运行成本以及预期的投资回报，导致项目盈利困难。

在我国电力现货市场与辅助服务市场的发展尚不成熟，市场体系有待完善。这使得混合式抽水蓄能电站所具备的巨大调节价值，无法在市场中得到充分且合理的定价与补偿，其潜在的经济效益难以完全释放。在梯级水电开发模式下，存在一个特殊问题：上游电站的抽水操作会对下游多个电站的发电效益产生连锁影响。如何科学、合理地在上游抽水电站与下游发电电站之间进行成本分摊以及收益分配，成为了一个复杂且棘手的内部核算难题。

在现有的市场机制环境下，混合式抽水蓄能电站商业模式的稳定性与确定性，相较于纯抽水蓄能电站（其成本可纳入输配电价进行回收）而言明显不足，这可能会在一定程度上削弱投资主体参与项目的积极性。

### 2.4 政策体制制约项目发展

政策与体制机制方面存在的障碍，给混合式抽水蓄能项目推进带来了不小挑战，其中审批流程复杂问题尤为突出。混合式抽水蓄能项目是对已建工程进行重大改造的特殊工程，由于项目特性，其审批工作往往需横跨能源、水利、自然资源、生态环境等多个关键部门。各部门职责不同、标准各异，使得审批流程变得极为繁琐，部门间的协调沟通难度大幅增加，项目推进效率受到严重影响。

在电价核定方面，目前也缺乏成熟的政策依据。对于这种兼具新建与改造性质的“半新半旧”项目，究竟该如何科学、合理地核定上网电价或容量电价，成为摆在面前的一道难题。政策的不明确，导致项目在经济效益评估上存在较大不确定性。若流域内的水电站分属不同业主，建设跨主体的混合式抽水蓄能项目更是困难重重。不同业主有着各自的利益诉求，在项目规划、建设、运营等各个环节，都面临着巨大的协调成本，利益分配问题也难以妥善解决，这无疑给项目的落地实施增添了重重阻碍。

### 2.5 防洪安全与生态影响并存

潜在的防洪安全与环境影响，是混合式抽水蓄能电站项目不容忽视的重要方面，其中水文情势的二次改变带来的问题尤为突出。水利部曾专门发文，明确严禁抽水蓄能电站占用防洪库容。尽管混合式抽水蓄能电站对大中型水库库容的占用通常有限，但在项目审批环节，一旦涉及防洪水库相关问题，项目推进便会陷入合规性困境。防洪安全关乎人民群众生命财产安全，任何可能影响防洪功能的行为都会受到严格审视，这使得相关项目在审批时面临巨大阻碍。

混合式抽水蓄能电站频繁的抽水和发电操作，会显著加剧水库水位的波动。这种水位的剧烈变化，可能打破库区周边原有的生态平衡，对周边景观造成破坏，影响土地的正常使用，威胁边坡的稳定性。同时，水生生物的栖息地也会受到干扰，它们的生存环境发生改变，可能导致部分物种数量减少甚至灭绝。

更为关键的是，在电站抽放水过程中，下水库会形成水流频繁往复流动的特殊现象。这种不规则的水流变化，会对水生生态系统产生深远影响，尤其是对鱼类产卵等关键生态环节造成干扰。鱼类产卵需要特定的水流、水温等条件，水流频繁变动可能破坏这些条件，影响鱼类的繁殖，进而对整个水生生态系统的稳定性和生物多样性产生负面影响。

### 三、总结与展望

混合式抽水蓄能开发可以以较低的成本、更快的速度、更小的环境代价，为新型电力系统提供了一个大规模、高效率、高可靠性的“灵活调节电源”和“巨型储能电站”。它不仅是水电行业自身挖潜增效的转型升级之路，更是打通新能源发展“最后一公里”、保障国家能源安全和顺利实现“双碳”战略目标的关键支撑技术之一。在当前背景下，大力发展混合式抽水蓄能，具有极其重要的现实意义和战略价值。

混合式抽水蓄能是水电领域极具智慧的“存量创新”，它用相对较小的代价，为解决新型电力系统的核心痛点提供了大规模、长时储能的优秀解决方案。然而，其成功推广不仅依赖于技术进步，更依赖于电力市场改革的深化和配套政策体系的完善。未来需要加快电力市场建设，建立能充分反映灵活调节资源价值的市场机制。出台专项支持政策，明确混合式抽蓄的电价形成机制和审批流程。加强技术研发，攻克机组优化、智能调度和环境影响评估等关键技术。开展试点示范，通过成功案例探索出可复制、可推广的开发与运营模式。只有解决了这些问题，混合式抽水蓄能的巨大潜力才能从理论走向现实，真正成为能源转型中的“中流砥柱”。

#### [参考文献]

[1]张汉朝, 张伟, 张耀丹, 等. 混合式抽水蓄能电站对依托下水库水文情势影响研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2025, 11(04)

[2]张智, 霍超, 郭尊, 等. 新型电力系统下抽水蓄能集群规划与运营关键问题综述及研究展望[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(15)

[3]黄莉, 甘恒玉, 刘兴举. 水风光一体化基地抽水蓄能电站成本分摊研究——以构皮滩-思林混合式抽水蓄能电站为例[J]. 建筑经济, 2024, 45(S2): 104-107

[4]刘欣雨. 梯级混合式抽水蓄能电站短期优化调度建模研究[D]. 西南科技大学, 2024.

[5]王玥瑶. 多元市场环境混合式抽水蓄能电站群联合调控方法[D]. 华北电力大学(北京), 2024.

作者简介: 陈锐意, 男, 出生年月: 1980年2月, 汉族, 籍贯: 贵州遵义, 大学本科, 高级工程师, 研究方向: 工程管理及电力市场运营管理;

黄桂兵, 1995年9月, 男, 汉族, 贵州省遵义市, 硕士研究生, 工程师, 工程水力学。