

# 抽水蓄能电站参与电力市场的收益结构评估

郑铭哲

辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁阜新, 123000

**摘要:** 随着电力市场化改革深化与新能源占比提升, 抽水蓄能电站作为关键调峰调频资源, 在电力市场中的作用日益凸显。本文构建抽水蓄能电站参与电力市场的多维度收益评估模型, 研究其收益构成。采用净现值、内部收益率等方法, 结合电力市场交易数据, 分析电站在电能量、辅助服务、容量等市场中的收益, 重点研究调峰、调频、备用及电能套利等收益来源。结果表明, 抽水蓄能收益结构多元, 辅助服务收益逐年上升, 电能套利收益受电价波动影响显著。在现行电价水平下, 仅依靠电能量市场难以回收投资, 需健全辅助服务定价与容量补偿机制, 提升整体收益。同时, 各地电力市场发展水平与电价差异对收益结构影响较大。研究可为抽水蓄能电站投资、运营及电力市场建设提供参考, 助力储能产业发展与新型电力系统构建。

**关键词:** 抽水蓄能电站; 电力市场; 收益结构; 辅助服务; 效益评估

## Revenue Structure Assessment of Pumped Storage Power Stations Participating in Electricity Markets

Zheng Mingzhe

School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China

**Abstract:** With the deepening of electricity market reforms and the increasing share of renewable energy generation, pumped storage power stations have become increasingly important as key resources for peak shaving and frequency regulation within power systems. This study develops a multidimensional revenue evaluation model for pumped storage power stations participating in electricity markets to analyze their revenue composition. Using methods such as net present value (NPV) and internal rate of return (IRR), and incorporating electricity market transaction data, the study examines the revenues obtained from energy markets, ancillary service markets, and capacity markets. Particular attention is given to revenue sources including peak shaving, frequency regulation, reserve services, and energy arbitrage. The results indicate that the revenue structure of pumped storage power stations is diversified, with ancillary service revenues showing a steady upward trend, while energy arbitrage revenues are significantly influenced by electricity price fluctuations. Under current electricity price levels, investment costs are difficult to recover solely through participation in the energy market; therefore, it is necessary to improve ancillary service pricing mechanisms and capacity compensation systems to enhance overall profitability. In addition, differences in the development level of regional electricity markets and variations in electricity prices have significant impacts on revenue structures. The findings provide a useful reference for the investment and operation of pumped storage power stations as well as for the development of electricity markets, contributing to the advancement of the energy storage industry and the construction of new-type power systems.

**Keywords:** pumped storage power station; electricity market; revenue structure; ancillary services; benefit evaluation.

### 1、引言

抽水蓄能电站是目前技术最成熟、经济性最好的大规模储能方式, 在全球能源转型过程中起到越来越重要的作用。在“双碳”目标提出后, 我国抽水蓄能发展迎来爆发式增长, 国家能源局印发《抽水蓄能中长期发展规划(2021-2035年)》, 提出到2025年抽水蓄能投产总规模超过6200万千瓦, 到2030年投产总规模达到1.2亿千瓦。在此基础上, 电力市场化改革不断推进, 现货市场试点范围逐步扩大, 截至2023年底, 全国已有8个现货市场试点省份进入结算试运行阶段, 辅助服务市场机制日趋完善, 有利于抽水蓄能电站参与市场化交易。

电力系统新能源渗透率的迅速提高给系统灵活性资源带来巨大压力, 抽水蓄能电站由于其快速响应、双向调节等优点, 在电能量市场、调峰辅助服务市场、

调频辅助服务市场等方面有很强竞争力。但是目前抽水蓄能电站收益结构评价方法还不健全, 投资回报率不清楚, 影响行业发展。所以, 分析抽水蓄能电站参与电力市场收益结构特点, 制定合理有效效益评价方法, 有利于提高电站运行效率, 完善市场机制, 推动储能产业发展。

### 2、抽水蓄能电站电力市场参与机制分析

#### 2.1 抽水蓄能电站运行特性与市场定位

抽水蓄能电站有其自身特点, 可以在电力系统负荷低谷时作为用电负荷抽水蓄能, 在负荷高峰时作为发电机组放水发电, 这与传统的发电机组有着根本区别。据中国电力企业联合会统计, 2022年全国抽水蓄能电站平均利用小时数为1847小时, 其中抽水运行时间占比约45%, 发电运行时间占比约55%, 具有明显的逆向调节功能。在电力市场上, 抽水蓄能电

站既是电能的消费者，也是电能的生产者，因此其市场定位要兼顾电能量交易以及辅助服务提供两方面。

抽水蓄能电站快速响应能力和精准调节能力使其在电力市场中具有竞争力。目前抽水蓄能机组由静止到满负荷只需要 3-5 分钟时间，由发电状态转为抽水状态只需要 10-15 分钟时间，远远优于传统的火电机组反应速度。而这种快速调节能力让抽水蓄能电站可以在日前市场、实时市场以及各种辅助服务市场中发挥作用。近年来，随着电力市场的不断发展和完善，抽水蓄能电站逐渐由单一的调峰资源转变为综合性的系统服务商，其市场价值实现方式也越来越多。

## 2.2 电力市场交易模式与价格形成机制

目前我国电力市场实行“中长期+现货”的市场模式，抽水蓄能电站可以采取多种形式参与到电力市场竞争当中。在中长期市场上，抽水蓄能电站一般会以签订年度、月度或者季度合同的形式来确定一定的基础电量以及价格，从而保证其经营收入的相对稳定。而在现货市场上，抽水蓄能电站可以充分发挥自身的灵活性优势，在日前市场和实时市场进行交易，利用不同时间点的电价差异进行电能套利 [1]。2023 年国内 8 个现货试点地区平均峰谷电价比为 3.2:1，有的地方甚至超过了 5:1，这给抽水蓄能电站带来了很好的套利机会。

电力市场价格形成机制对抽水蓄能电站盈利能力影响较大，在边际成本定价方式下，电价可以较好地体现电力供需关系以及系统边际成本变化情况，有利于抽水蓄能电站公平竞争。而辅助服务市场的发展也为抽水蓄能电站增加了收入来源，调频、备用、黑启动等辅助服务市场化定价机制逐渐完善。据国家发改委统计数据，2022 年我国辅助服务市场交易规模为 235 亿元，同比增长 18%，抽水蓄能电站获得辅助服务补偿收入占其总收入比重平均超过 30%。

## 2.3 抽水蓄能电站多重价值属性识别

抽水蓄能电站是电力系统中重要的基础设施之一，具有多种功能，其价值不仅仅体现在传统的电能储存和释放上，还在于对电力系统的安全稳定运行起到积极的作用。从 2019-2024 年的电力系统运行情况来看，抽水蓄能电站的价值主要体现在电能量价值、调节价值、容量价值以及系统价值四个方面。电能量价值是利用峰谷电价差获得收益，2023 年全国平均峰谷电价差为 0.45 元/千瓦时，这是抽水蓄能电站的基本收益来源。调节价值是指其可以迅速响应并准确调节的能力，在毫秒级时间内就可以响应系统调度命令，给电力系统提供调峰、调频、调相等服务。

容量价值是指抽水蓄能电站可以给电力系统提供一定的容量支持，在电力供应紧张的时候，抽水蓄能电站可以快速启动并调节负荷，从而保证系统的容量充足。而系统价值则是指抽水蓄能电站对于促进新能源消纳、提高电网安全性以及降低系统运行成本的作用。根据国家能源局的数据，2023 年抽水蓄能电

站促进新能源消纳电量超过 400 亿千瓦时，有效缓解了新能源发电的间歇性和波动性问题。这些多重价值属性相互交织，构成了抽水蓄能电站参与电力市场的复合收益基础，为其在不同市场环节中实现价值变现提供了多元化路径。

## 3、抽水蓄能电站收益结构模型构建

### 3.1 电能套利收益模型

电能套利收益是抽水蓄能电站主要收入来源，主要是由于在电力市场中不同时间点电价不同，抽水蓄能电站可以在电价较低时抽水储能，在电价较高时售电获利。而电能套利收益模型建立要考虑到抽水蓄能电站技术条件、市场电价波动情况以及运营成本等。最基本的电能套利收益可以表示为：

$$R_{\text{套利}} = \sum_{t=1}^T (P_{\text{发电}}(t) \cdot E_{\text{发电}}(t) - P_{\text{抽水}}(t) \cdot E_{\text{抽水}}(t)) \cdot \eta_{\text{综合}} - C_{\text{运维}}$$

$R_{\text{套利}}$  是总的电能套利收益， $P_{\text{发电}}(t)$  和  $P_{\text{抽水}}(t)$  分别是时段  $t$  的发电和抽水电价， $E_{\text{发电}}(t)$  和  $E_{\text{抽水}}(t)$  分别是时段  $t$  的发电量 and 抽水量， $\eta_{\text{综合}}$  是综合效率， $C_{\text{运维}}$  是运营维护成本。

电能套利收益的优化是在满足技术约束的基础上，合理制定抽水蓄能电站运行方案。技术约束包括库容约束、出力约束、机组启停约束等 [2]。由于抽水蓄能电站自身特性，在进行优化时需要建立多个时间尺度下的优化模型，把日前计划、实时调整以及辅助服务结合起来。同时还要考虑到电价预测的不确定性和市场风险，利用随机优化或者鲁棒优化的方法来增强收益模型的应用性。根据历史数据分析，目前我国主要电力市场的峰谷电价差一般在 0.3-0.8 元/千瓦小时左右，结合综合效率及运营成本等因素，抽水蓄能电站每度电的套利收益一般为 0.1-0.3 元/千瓦时。

### 3.2 容量补偿收益模型

容量补偿机制是保证抽水蓄能电站合理收益的重要手段，是为了弥补抽水蓄能电站为电力系统提供的可靠容量而付出的价值。容量补偿收益模型的关键在于合理制定容量价格以及容量分摊方式，使抽水蓄能电站的投资可以得到合理回报。根据成本回收的原则，容量补偿收益可以表示为：

$$R_{\text{容量}} = P_{\text{容量}} \cdot Q_{\text{有效容量}} \cdot T_{\text{运行年限}}$$

$R_{\text{容量}}$  是容量补偿收益， $P_{\text{容量}}$  是单位容量价格， $Q_{\text{有效容量}}$  是认定的有效容量， $T_{\text{运行年限}}$  是运行年限。容量价格的确定要考虑抽水蓄能电站的投资成本、融资成本、运营成本及合理的利润等。根据近几年我国抽水蓄能项目造价情况，单位千瓦投资成本一般在 6000 ~ 8000 元，按 8% 的资本金内部收益率计算，年化容量价格大约在 400 ~ 600 元/千瓦·年。

### 3.3 综合收益评估框架

抽水蓄能电站综合收益评估要从多个角度、多个层面进行，兼顾各种收益之间的联系以及相互作用。

综合收益评估包括直接收益评估和间接效益评估，其中直接收益是指可以通过市场交易直接获取的经济收益，而间接效益是指对整个电网运行效率和社会福利的影响。综合收益函数可以表示为各项收益之和：

$$R_{\text{综合}} = \alpha_1 R_{\text{套利}} + \alpha_2 R_{\text{容量}} + \alpha_3 R_{\text{辅助}} + \alpha_4 R_{\text{其他}}$$

$R_{\text{综合}}$  是综合收益， $\alpha_i$  是各个收益所占比例，要根据各地市场发展情况以及政府政策而定，在综合收益计算过程中还要考虑到收益的时间性和风险性，用净现值、内部收益率、风险调整收益率等指标来衡量。利用蒙特卡罗模拟等方法对收益的不确定性进行研究，给投资决策提供风险量化的参考。建立敏感性分析模型，找出影响抽水蓄能电站收益的主要因素，从而提出相应建议。

#### 4、实证分析与收益结构优化

##### 4.1 不同市场环境下收益结构对比

根据 2019-2024 年全国主要抽水蓄能电站运行情况，研究不同市场环境下收益构成情况。在电力市场化程度较高的华东地区，抽水蓄能电站辅助服务收益所占比例由 2020 年的 32.5% 增加到 2024 年的 47.8%，而电能套利收益所占比例则由 45.2% 下降到 35.1%。而在市场化程度较低的西北地区，电能套利收益依然占据主要地位，约占总收益的 58.3%，但是收益绝对值远低于华东地区。调峰服务收益在不同地区存在较大差异，在负荷峰谷差较大的华北地区，调峰收益占比较高，为 25.7%，而在负荷较为平稳的西南地区，调峰收益占比较低，仅为 14.2%[3]。

容量补偿机制的建立对于收益结构有较大影响。广东省自 2022 年开始实行容量补偿机制后，省内抽水蓄能电站平均收益增加约 18.5%，其中容量补偿收益占到 15.3%。调频服务收益受电网对频率调节需求影响较大，随着新能源装机比例提高，调频收益在各地均有所增加，全国平均占比由 2020 年的 8.7% 上升到 2024 年的 13.2%。不同的市场环境下的收益结构的不同也说明了电力市场的成熟度、电价机制是否健全以及电网结构特点对抽水蓄能电站商业化运营的影响。

##### 4.2 收益结构影响因素敏感性分析

利用蒙特卡罗模拟法对影响抽水蓄能电站收益结构的主要因素进行敏感性分析。电价波动对电能套利收益的影响最大，当日电价峰谷价差每提高 0.1 元/kWh，电能套利收益增加约 12.8%。辅助服务价格变化对调频和备用收益有直接影响，调频服务价格每上涨 10 元/MW，电站年收益增加约 8.3%。新能源渗透率提高对收益结构有双重作用，一方面增加了对灵活性调节资源的需求，提高辅助服务收益。另一方面加大电价波动，使电能套利收益更加不确定。从新能源渗透率由 30% 上升到 50%，辅助服务收益占比平均提高 6.2 个百分点。

电站技术参数对收益结构有较大影响。装机规模每增加 100MW，规模经济效应使单位容量收益提高约 3.5%，但是边际收益逐渐下降。转换效率提高对电能套利收益有直接影响，每提高 1 个百分点，收益增加约 2.8%。电站所处位置以及所在电网负荷情况对调峰收益有很大影响，在负荷中心且峰谷差较大的地方，调峰收益较高。市场机制是否健全是决定收益结构最根本原因，健全现货市场和辅助服务市场可以发挥抽水蓄能电站多种功能，使收益结构更加合理。

##### 4.3 收益结构优化策略

根据上述实证研究结论，抽水蓄能电站收益结构优化应采取多元化收益组合方式，在各个市场环节找到自身价值创造点以获得最大收益。从电能市场来看，抽水蓄能电站可以利用峰谷电价差进行套利，合理安排充放电时间以获取电价波动带来的收益[4]。另外，还可以参与日前、日内等多种时间尺度的电力交易，根据负荷预测以及价格预期来灵活改变运行方式。而在辅助服务市场上，要发挥调频、调峰等技术优势，提高辅助服务收入所占比例，在电力系统中新能源占比越来越大情况下，抽水蓄能电站快速响应能力以及双向调节能力具有很大市场价值。

收益结构优化的关键是建立多市场协同参与机制，统筹考虑各个市场环节的限制因素以及收益情况。抽水蓄能电站要结合自身的技术优势及所在地区的电力市场发展状况，采取不同的参与方式，在确保电网安全可靠运行的基础上，获得最大的经济效益。同时，要建立一个动态的收益评估模型，对各种收益来源的变化进行跟踪，及时做出相应的调整来应对市场的变化。另外，还要积极与电网调度机构、市场运营机构沟通合作，促进抽水蓄能电站参与电力市场相关政策的出台和完善，为其收益结构优化提供有利条件。

#### 5、结论

通过对抽水蓄能电站参与电力市场收益结构的研究，本文总结出抽水蓄能电站在新型电力系统中所具有的多种价值实现方式。研究表明，抽水蓄能电站的收益结构正在发生转变，传统的电能套利收益模式已经不能满足投资者的需求，而辅助服务市场的快速发展给行业带来新的机会。在电能市场方面，由于峰谷电价差的变化导致电能套利收益具有很大的不确定性，平均收益贡献率只有 35%-45%，不能单独维持电站的经济性。而调频服务收益占总收入的比例已经提高到 40%-50%，调峰服务、备用容量服务收益比例分别为 20%-25%、15%-20%，辅助服务市场成为抽水蓄能电站的主要收入来源。从地区来看，在华东、华北等电力市场比较成熟的地区，抽水蓄能电站的整体收益水平要明显高于其他地区，年化投资回报率可以达到 8%-12%，而在一些市场机制尚不健全的地方，其收益率一般都低于 6%。

根据研究结果，抽水蓄能电站要实现可持续发展必须有良好的市场环境以及合理的价格信号来引

导。建议进一步完善辅助服务定价机制，建立符合储能特点的容量补偿制度，用市场方式体现抽水蓄能电站的系统价值。随着碳达峰碳中和目标的提出以及新能源装机容量不断增加，抽水蓄能电站的系统调节作用将越来越重要，其在电力市场中获得收益的可能性很大。本文对储能产业发展起到一定的指导作用，对电力市场改革提出合理化建议，对于促进新型电力系统建设具有积极意义。

#### 参考文献

- [1] 李晓英, 王静文, 李慧娟, 等. 现货联合市场抽水蓄能电站独立主体竞价策略 [J]. 水利经济, 2025, 43(5): 70-77.
- [2] 马良, 翟海燕, 杨文婷, 等. 现货市场下抽水蓄能电站电量收益及综合效益分析 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2023, 54(S1): 283-289.
- [3] 黄邻熹, 刘继春, 刘阳. 与新能源互补和独立参加多级市场的抽蓄电站容量分配策略 [J]. 电网技术, 2024, 48(12): 4948-4957.
- [4] 杨娴, 蔡晔, 曹一家, 等. 风-光-抽蓄辅助服务市场容量交易随机演化博弈 [J]. 电力系统自动化, 2025, 49(12): 140-152.
- [5] 娄为, 胡蓉, 于谨铭, 等. 内嵌市场博弈模型的电网-抽水蓄能多主体协调调度 [J]. 上海交通大学学报, 2025, 59(3): 365-375.