

基于全生命周期的电网侧独立电化学储能电站投资评估分析

刘婷婷

上海电力股份有限公司吴泾热电厂, 上海 201100

[摘要]随着新型电力系统建设的推进,独立储能电站在提升电网灵活性与促进新能源消纳方面发挥着日益重要的作用。为响应国家“双碳”战略与上海市新型电力系统建设需求,电网侧独立储能电站需兼具高功率与长时调峰能力。本论文针对上海首批储能示范项目——闵行吴泾电厂 102MW/228MWh 独立储能项目,创新性地采用磷酸铁锂电池与全钒液流电池混合技术路线,基于全生命周期理论构建了混合储能系统的成本-收益模型。研究结果表明,该储能电站初始静态投资为 27,936 万元,年均收益主要来源于现货市场差价收入、发电量补贴和容量租赁/补偿收入等。经测算,在项目运营期内,累计净现值为正 3605 万元,内部收益率可达 8.3%,投资回收期约为 15 年,项目具备良好的经济可行性。本论文研究可为上海及同类地区独立储能电站的投资决策提供理论参考与实践依据。

[关键词]电化学储能;混合储能系统;全生命周期;投资评价;独立储能电站

DOI: 10.33142/hst.v9i6.20076

中图分类号: TM715.9

文献标识码: A

Investment Evaluation and Analysis of Grid Side Independent Electrochemical Energy Storage Power Plants Based on the Whole Life Cycle

LIU Tingting

Wujing Thermal Power Plant of Shanghai Electric Power Co., Ltd., Shanghai, 201100, China

Abstract: With the advancement of the construction of new power systems, independent energy storage stations are playing an increasingly important role in improving the flexibility of the power grid and promoting the consumption of new energy. In response to the national "dual carbon" strategy and the construction needs of Shanghai's new power system, independent energy storage power stations on the grid side need to have both high power and long-term peak shaving capabilities. This paper focuses on the first batch of energy storage demonstration projects in Shanghai - the 102MW/228MWh independent energy storage project of Minhang Wujing Power Plant. It innovatively adopts a hybrid technology route of lithium iron phosphate battery and all vanadium flow battery, and constructs a cost-benefit model of the hybrid energy storage system based on the full life cycle theory. The research results indicate that the initial static investment of the energy storage power station is 279.36 million Yuan, and the annual average income mainly comes from spot market price difference income, discharge subsidy, and capacity leasing/compensation income. According to calculations, the cumulative net present value during the project operation period is positive 36.05 million Yuan, the internal rate of return can reach 8.3%, and the investment payback period is about 15 years. The project has good economic feasibility. This paper can provide theoretical reference and practical basis for investment decision-making of independent energy storage power stations in Shanghai and similar regions.

Keywords: electrochemical energy storage; hybrid energy storage system; whole life cycle; investment evaluation; independent energy storage power station

引言

储能技术是构建新型电力系统、保障电网安全稳定运行的关键组成部分。随着“双碳”战略的深入推进,储能系统在提升电网灵活性、促进新能源消纳、提供调频辅助服务等方面的作用日益凸显。然而,储能产业在迎来规模

化发展的同时,其在商业上的广泛推广仍面临核心挑战:初始投资成本高昂、多元化商业模式尚未成熟,以及全生命周期收益难以精准量化。其中,储能价值的准确衡量与投资经济性的可靠评估,被普遍认为是破除市场发展障碍、引导资本有序投入的关键。

在此背景下,针对储能系统开展全生命周期经济性研究显得尤为重要。当前,该领域研究可大致归纳为两条主线:其一侧重于系统配置与调度优化,聚焦于多源电网协同、用户侧储能优化及风光储联合调度等^[1-12];其二侧重于项目经济评价方法^[13-23],涉及调频改造方案的经济性、全生命周期成本模拟及考虑电池寿命的竞价策略等^[7]。然而,既有研究多集中于单一技术路线的储能系统,或局限于特定应用场景的收益分析^[10],对于在复杂电网环境下,采用混合技术路线的独立储能电站,其全生命周期的投资经济性研究尚显不足。

近年来,国家与地方层面密集出台政策以推动新型储能发展。2022年,我国在全球新增投运新型储能项目中脱颖而出,占比高达36%,远超欧洲和美国。到了2023年,这一优势进一步得到巩固。目前,我国已验证了包括钠离子电池、液流电池、飞轮储能、重力储能以及二氧化碳压缩空气储能等在内的多种技术路线。值得一提的是,我国锂电池在储能领域已相当成熟,2023年的出货量(206000兆瓦时)更是占据了全球总出货量的90%以上。此外,我们还初步构建了电源侧、电网侧和用户侧等多场景下的新型储能应用模式。特别是对于上海这样的超大型城市,作为典型的受端电网,其负荷密度高、本地调节资源紧张,对电网侧独立储能的需求尤为迫切。为响应国家战略与本地电网升级需求,电网侧独立储能电站也需兼具高功率与长时调峰能力。

本研究首先对电化学储能电站全生命周期内的成本与收益构成进行系统性分析;随后,构建一套适用于独立储能电站的经济性评价指标体系;以上海地区首批电网侧独立储能示范项目——闵行吴泾电厂102MW/228MWh独立储能项目为例,进行详尽的投资经济性评估;最后,识别并分析项目投资过程中的关键风险因素,以期上海及同类地区电网侧独立储能项目的精准投资与科学决策提供参考与理论支撑。

1 混合储能电站全生命周期成本分析

储能电站的全生命周期成本是评估其经济性的基石。对于采用混合技术路线的储能系统,其成本结构相较于单一技术路线更为复杂。本节将基于全生命周期理论,对储能电站的成本构成进行分析,主要包括建设期的初始投资、运行期的经营与折旧成本,以及回收期的设备处理成本。

1.1 初始投资成本

初始投资成本是项目在建设期内一次性投入的资本性支出,决定了项目折旧基础与财务压力。本项目的初始投资构成主要由设备购置成本、建安工程和其他费用。

(1) 设备购置成本

设备成本是初始投资的核心,混合系统需根据技术路线分别核算。每种技术路线所包含的设备成本 C_1 主要包括电池舱、储能变流器(PCS)、能量管理系统(EMS)、电池管理系统(BMS)及配套设备的购买成本。

$$C_1 = \sum_i k_i \times R_i \quad (1)$$

式中: k_i 为第 i 个技术路线电池系统设备总包的单位造价(元/Wh); R_i 为该技术路线电池系统对应的电池装机容量(Wh)。

其他主要设备采购成本 C_2 ,主要由采购设备供应商提供,具体计算过程不在此详细讨论。

(2) 建安工程及其他费用

建安工程成本 C_3 :包括土建施工、设备安装及电网接入系统等费用。设备安装成本 C_4 可表示为:

$$C_4 = \sum_i h_i \times R_i \quad (2)$$

式中: h_i 分别为各电池系统的单位安装成本, R_i 为对应电池系统的容量。

工程建设其他费用 C_4 :包括建设管理费、生产准备费、项目建设技术服务费等,主要由建设单位与技术服务厂家视情况而定,具体计算过程不在此详细讨论。

1.2 运营维护成本

储能系统的年运营维护成本 C_6 是为了维持电站日常运营所产生的费用,包括设备的日常检修维护、电费、人员工资及保险费等。该成本与系统容量相关,可表示为:

$$C_6 = \sum_i j_i \times R_i \quad (3)$$

式中: j_i 分别为两种电池系统的年单位运营维护成本。

1.3 设备回收成本

在储能系统使用寿命结束后,对废弃电池设备的拆卸、处理所需成本 C_7 ,为一次性回收成本。项目折旧年限取 n 年,电池参与率取 $x\%$ 。在储能系统混合技术路线中,可以考虑将电池残值率高的电池系统的设备金额的一定比例作为回收年的一次性收益来补偿该电池系统的损失。

其中,折旧费=固定资产原值×综合折旧率;综合折旧率=(1-残值率)/折旧年限。

2 储能电站全生命周期收益分析

独立电化学储能电站的收益模式与各地区政策紧密相关。国内关于储能电站的盈利模式主要包含:峰谷电价差套利、辅助服务收益、容量补偿与租赁、电力现货市场交易和政策补贴等。以上海市为例,根据2024年上海市人民政府办公厅关于印发的《上海市新型储能示范引领创新发展工作方案(2025—2030年)》,独立储能电站的收

益主要来源于以下几个方面:

2.1 现货市场差价收入

在电力现货市场长周期结算试运行前,独立储能电站按电网调度指令进行充放电。迎峰度夏(冬)期间,调用次数不低于 210 次。充放电价差以上海市煤电基准上网电价(0.415 元/kWh)为基准计算:充电价下浮 50%,放电价上浮 20%,形成约 0.29 元/kWh 的价差。

假设电池系统按照折损前的电量作为充电量,在该盈利模式下,独立储能电站的收益为:

$$C_8 = \sum_i [Ri \times 210 \times 0.415 \times (1 + 20\%) - Ri \times 210 / \eta_i \times 0.415 \times (1 - 50\%)] \quad (4)$$

式中: η_i 为各电池系统的电池效率。

2.2 发电量补贴收入

根据《上海市新型电力系统调节能力奖励资金管理办法》,对纳入示范项目目录的新型储能,按实际发电量给予 0.35 元/kWh 奖励,奖励期 3 年,根据不同技术路线需满足容量奖励或调用次数上限。在该盈利模式下,储能电站的收益为:

$$C_9 = R_i \times 210 \times 0.35 \quad (5)$$

2.3 容量租赁/补偿收入

根据政策,新能源项目需配置一定比例的储能容量。独立储能电站可通过容量租赁获取稳定收益。具体收益需考虑当地租赁价格与电池系统的容量及容量衰减,因不同电化学电池系统容量衰减成不同,具体计算过程不在此详细展述。

3 储能电站全生命周期经济性评价指标

为科学评估电化储能项目的经济性,需采用一系列动态评价指标。本部分阐述储能电站投资项目中常用的几类经济性评价指标,包括投资净现值、内部收益率和投资回收期,用以计算项目投资的经济收益情况,为投资者的投资选择提供参考。

3.1 净现值

净现值是指项目生命周期内各年净现金流量,按一定折现率折现到期初的现值之和。当 $NPV \geq 0$ 时,项目具备经济可行性。

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CI_t - CO_t}{(1 + i_0)^t} \quad (6)$$

式中: CI_t 为第 t 年现金流入; CO_t 为第 t 年现金流出; i_0 为基准折现率; n 为项目生命周期。

3.2 内部收益率

内部收益率是使项目全生命周期内净现值等于零时的折现率。当 $IRR \geq$ 基准收益率时,项目盈利能力可接受。

$$\sum_{t=0}^n \frac{CI_t - CO_t}{(1 + IRR)^t} = 0 \quad (7)$$

3.3 投资回收期

投资回收期是以项目净收益抵偿全部投资所需的时间。回收期越短,项目投资风险越低。

$$\sum_{t=0}^{T_p} (CI_t - CO_t) = 0 \quad (8)$$

式中: T_p 为投资回收期。

4 独立储能电站投资经济性评估案例分析

结合上海市相关政策,以上海市总容量为 102MW/228MWh 的闵行吴泾电厂独立储能电站为例,对电化学独立储能电站的投资进行经济性评估分析。闵行吴泾电厂独立储能电站采用容量为 90MW/180MWh 的磷酸铁锂电池系统和容量为 12MW/48MWh 的全钒液流电池系统两条技术路线,除储能系统主要设备外,还配备了一座 220KV 的升压站,利用厂内现有的 220KV 线路接入公共电网。以下是该储能电站具体的投资收益情况分析。

4.1 投资成本估算

本项目投资成本估算基于当前市场价格与同类工程经验。储能系统设备购置成本为核心支出,其中磷酸铁锂电池系统单位造价为 0.48 元/Wh,全钒液流电池系统单位造价为 2.18 元/Wh,220kV 主变压器采购成本为 1,400 万元。建安工程及其他费用参考近期同类项目合同价确定。项目初始静态总投资为 27,936 万元。

4.2 运营期成本与收益

4.2.1 年运营成本

年运营成本包括运维费、电费、人员工资等。磷酸铁锂电池运维成本约 6 元/kWh,并在第 9 年和第 17 年考虑电芯更换,更换费用按 0.30 元/Wh 计算;全钒液流电池年运维成本约 110 万元。

4.2.2 年收益构成:

(1) 差价收入

根据《上海市新型储能示范引领创新发展工作方案(2025—2030 年)》,磷酸铁锂电池按照全年调用 210 次,按照效率折损前 3346 万 kWh 作为充电量,算每年充放电收益 839 万元。全钒液流电池容量按照 12MW/48MWh 考虑,按照一年调用 210 次测算(保守测算,充放电价差约 0.29 元/kWh),根据效率折损前 1551 万 kWh 作为充电量,算每年充放电收益 180 万元。

(2) 补贴收入

根据《上海市新型电力系统调节能力奖励资金管理办

法》，按实际发电量给予 0.35 元/kW h 奖励 3 年。磷酸铁锂电池容量按照 90MW/180MWh 考虑，调用次数按照 210 次/年考虑，全年 1077 万元考虑收益。全钒液流电池容量按照 12MW/48MWh 考虑，调用次数按 150 次/年考虑，全年 353 万元考虑收益。

(3) 容量租赁收入

根据上海市相关政策，结合上海市 430 万千瓦深远海风电竞配规则（按照 20%/2h 配建储能），磷酸铁锂电池考虑 90MW/180MWh 租赁，租赁价格按 100 元/kWh 年（含税，税率 13%）计列。具体收入详情见表 1。

全钒液流电池考虑 12MW/48MWh 满容量租赁，液流电池部分按每年 324 万元考虑。具体收入详情见表 2 所示。

4.3 经济性评价结果

基于全生命周期现金流测算，本项目核心经济性评价指标如下：累计净现值（税后）为 3,605 万元（>0），内部收益率为 8.3%，动态投资回收期为 15 年。上述指标表明，项目在生命周期内能够覆盖初始投资并实现超额收益，投资回收期短于运营期限，盈利能力满足行业基准要求。因此，在当前政策与市场环境下，预测该项目具备良好的经济可行性。

表 1 磷酸铁锂电池系统容量租赁收入测算表

年份	放电效率	放电深度	衰减后容量占比	容量折减系数	年度补偿（元/kW）	补偿额度（万元）
1	92%	95%	95%	83.03	166	1494
2	92%	95%	93%	81.28	162	1463
3	92%	95%	91%	79.53	159	1431
4	92%	95%	89%	77.79	155	1400
5	92%	95%	87%	76.04	152	1368
6	92%	95%	85%	72.29	148	1337
7	92%	95%	83%	72.54	145	1305
8	92%	95%	81%	70.79	141	1274
9	92%	95%	95%	83.03	166	1494
10	92%	95%	93%	81.28	162	1463
11	92%	95%	91%	79.53	159	1431
12	92%	95%	89%	77.79	155	1400
13	92%	95%	87%	76.04	152	1368
14	92%	95%	85%	74.29	148	1337
15	92%	95%	83%	72.54	145	1305
16	92%	95%	81%	70.79	141	1274
17	92%	95%	95%	83.03	166	1494
18	92%	95%	93%	81.28	162	1463
19	92%	95%	91%	79.35	159	1431
20	92%	95%	89%	77.79	155	1400
21	92%	95%	87%	76.04	152	1368
22	92%	95%	85%	74.29	148	1337
23	92%	95%	83%	72.54	145	1305
24	92%	95%	81%	70.79	141	1274
25	92%	95%	79%	69.05	138	1242
25 年平均	92%	95%	88%	76.60	153	1278

表 2 全钒液流电池系统容量租赁参数及收入

液流电池参数	参数值
放电效率	81%
放电深度	100%
衰减后容量占比	100%
容量折损系数	81%
年度补偿（元/kW）	324
补偿额度（万元）	388

5 风险因素分析

储能电站生命周期长,其经济性受多重风险因素影响:

(1) 政策变化风险:补贴政策、容量补偿标准和市场规则的变动对项目收益影响显著。

(2) 电价波动风险:现货市场电价波动影响套利空间,峰谷价差收窄将直接降低差价收入。

(3) 技术迭代与成本风险:电池技术快速迭代可能导致设备固定资产贬值;锂电池等关键材料价格波动影响初始投资与残值评估。

(4) 寿命与性能衰减风险:电化学储能的实际循环寿命与理论值可能存在偏差,性能加速衰减将影响中长期收益。

6 结束语

本研究基于全生命周期理论,构建了电网侧独立混合储能电站的成本-收益模型,并以上海闵行吴泾电厂独立储能项目为例进行了实证分析。研究表明,在现行政策框架下,采用“磷酸铁锂+全钒液流”混合技术路线的独立储能项目具有良好的经济可行性。研究成果可为投资者系统了解储能项目全生命周期的经济特性提供分析框架,并为相关投资决策提供理论依据与数据支持。未来,随着电力市场机制的不断完善与储能技术的持续进步,独立储能电站的商业模式将更加多元,经济性有望进一步提升。

[参考文献]

- [1] 聂保瑞,鞠立伟,杨慧,等.计及时空响应特性的电力系统灵活性资源配置优化模型[J].电力建设,2024,45(8):51-61.
- [2] 李咸善,胡长宇,张远航,等.风电租赁储能参与电能-调频市场竞价策略[J].电网技术,2024,48(5):1992-2002.
- [3] 史瑞静,王维庆,樊小朝,等.高比例风电电力系统储能运行及配置分析[J].水力发电,2024,50(7):79-85.
- [4] 陈泽宇,陈艳波.计及循环寿命和电能量-调频市场出清的储能自调度策略[J].电力系统自动化,2024,48(14):28-41.
- [5] 赵攀,苟非非,许文盼,等.风-火-储耦合系统储能容量配置优化对比[J].西安交通大学学报,2024,58(8):38-48.
- [6] 尚博阳,许寅,王颖,等.参与辅助服务的用户侧储能优化配置及经济分析[J].中国电力,2023,56(2):164-170.
- [7] 朱继忠,余鹏飞,禚培正,等.计及风电和储能的综合经济调度方法[J].南方电网技术,2017,11(2):2-7.
- [8] 何奇,张宇,邓玲,等.基于水电储能调节的风光水发电联合

优化调度策略[J].广东电力,2024,37(3):12-24.

[9] 苟凯杰,吕鸣阳,高悦,等.风-光-储和需求响应协同的虚拟电厂日前经济调度优化[J].广东电力,2024,37(2):18-24.

[10] 王晓兴.用户侧储能项目的方案选择及成本分析、经济性评估方法[J].现代工业经济和信总化,2023,13(8):238-241.

[11] 赵焱,杨俊丰,庞建霞,等.考虑混合储能主动参与风光储电站的功率分配与调频策略[J].电力建设,2024,45(7):144-155.

[12] 赵斌,梁告,姜孟浩,等.光储系统并网功率波动平抑及储能优化配置[J].发电技术,2024,45(3):423-433.

[13] 张莉,廖菁,戴丹丹,等.新型储能容量电价机制研究[J].价格理论与实践,2023(12):122-127.

[14] 赵鹏翔,覃振坤,郭东旭,等.综合能源灵活性评价指标体系与评估模型[J].分布式能源,2023,8(6):66-76.

[15] 刘晓林,陈丽,陈永安,等.“峰谷套利”模式下的先进压缩空气储能电站经济性研究——以湖北省电价政策为例[J].价值工程,2023,42(34):20-22.

[16] 肖博,侯玉婷,包正睿,等.电网侧电池储能电站综合评价模型研究[J].自动化技术与应用,2023,42(11):26-29.

[17] 陈志华,尤梦凯,蔡伟,等.考虑全寿命周期的储能电站综合评价模型[J].发电技术,2023,44(6):883-888.

[18] 张中丹,皮霞,杨德州,等.电池储能电站替代变电站升级的优化决策配置方法[J].电力建设,2023,44(7):41-49.

[19] 黄潇.储能项目投资研究与应用[J].中国集体经济,2023(30):72-75.

[20] 范展滔,姚伟峰,蔡秋娜,等.电网经济运行评估机制与管理框架[J].南方电网技术,2013,7(1):85-89.

[21] 张立,牟法海,周中锋,等.电池储能参与发电厂 AGC 调频技术与经济分析[J].电工技术,2018(8):76-78.

[22] 杜贵和,王正风.电网经济运行的评估与优化[J].南方电网技术,2011,5(3):94-97.

[23] 王彦峰,王春玲,潘柏崇,等.多站融合中考虑可靠性及经济性的储能站两阶段优化配置方法[J].电力建设,2024,45(7):134-143.

作者简介:刘婷婷(1997—),女,山东济南人,助理工程师,上海电力大学大数据技术与工程专业毕业,现就职于上海电力股份有限公司吴泾热电厂,从事设备检修工作。