



不同应用场景下超级电容储能经济性对比研究

司婉茹¹, 司浩楷²

(¹驻马店职业技术学院, 河南 驻马店 463000; ²青岛城市学院, 山东 青岛 266106)

摘 要: 超级电容储能具有高功率密度、长循环寿命和快速响应特性, 在不同应用场景下的经济性存在显著差异。为明确超级电容储能的最优应用场景, 本文构建全寿命周期成本与收益测算体系, 分别对电网调频、轨道交通和工业削峰填谷三大典型场景开展经济性核算, 通过横向对比各场景投资成本、收益水平与回本周期差异, 分析超级电容储能的场景适配特性并提出相应建议, 研究结果可为超级电容储能的场景化推广及商业化应用提供参考。

关键词: 超级电容储能; 全寿命周期; 经济性测算; 适配性分析

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0655

中图分类号: TM 913; TM 914.4

文献标志码: A 文章编号: 2095-4239 (2026) 08-3385-03

Economic comparison of supercapacitor energy storage in different application scenarios

SI Wanru¹, SI Haokai²

(¹Zhumadian Vocational and Technical College, Zhumadian 463000, Henan, China; ²Qingdao City University, Qingdao 266106, Shandong, China)

Abstract: Supercapacitor energy storage boasts high power density, long cycle life, and rapid response characteristics, with significant economic differences across various application scenarios. To identify the optimal application scenarios for supercapacitor energy storage, this study establishes a life-cycle cost and multi-benefit assessment system. It conducts economic evaluations for three typical scenarios: grid frequency regulation, energy recovery in rail transit, and industrial peak shaving and valley filling. By comparing the investment costs, benefit levels, and payback periods across these scenarios, the study analyzes the scenario suitability of supercapacitor energy storage. The findings provide a reference for the scenario-specific promotion and commercial application of supercapacitor energy storage.

Keywords: supercapacitor energy storage; full life cycle; economic assessment; adaptability analysis

在新型电力系统建设与储能产业快速发展的背景下, 功率型储能的市场应用需求持续提升。超级电容储能具备瞬时大功率响应、耐频繁充放电、使

用寿命久的独特优势, 可适配多种短时高频的储能应用场景^[1]。目前业内对超级电容储能的技术研究较为成熟, 但针对不同应用场景的经济性对比研究

收稿日期: 2026-07-28。

基金项目: 驻马店市哲学社会科学规划项目 (23L115)。

第一作者及通信联系人: 司婉茹 (1993—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为经济管理, E-mail: siwanru1206@163.com。

引用本文: 司婉茹, 司浩楷. 不同应用场景下超级电容储能经济性对比研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(8): 3385-3387.

Citation: SI Wanru, SI Haokai. Economic comparison of supercapacitor energy storage in different application scenarios[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(8): 3385-3387.

相对匮乏。基于此,本文选取三类典型场景,依托标准化测算模型开展量化对比分析,探究超级电容储能不同场景的经济优势与应用短板,为其规模化应用提供数据与实践支撑。

1 超级电容典型应用场景及经济性测算模型

1.1 典型应用场景界定

根据超级电容的技术特性和当前产业化应用现状^[2],选取电网调频辅助服务、轨道交通制动能量回收、工业负荷削峰填谷三类主流应用场景作为研究对象。电网调频场景配套发电机组开展AGC快速功率调节,运行以毫秒级高频功率吞吐,用于抵消新能源出力波动造成的电网频率偏移。轨道交通场景覆盖地铁、市域列车,适配车辆频繁启停运行特征,单次能量充放电时长不超过30秒,用于吸纳列车减速制动产生的瞬时大功率再生电能。工业削峰填谷场景面向装备制造、港口装卸等存在冲击性用电负荷的厂区,日常充放电循环频次较低,主要用于平抑短时用电高峰,降低厂区瞬时负荷峰值。

1.2 全寿命周期成本测算模型

本文采用全寿命周期成本(life cycle cost, LCC)方法对超级电容储能系统在各场景下的经济性进行统一测算。全寿命周期成本总额公式表示为:

$$LCC = C_{init} + C_{O\&M} + C_{rep} + C_{disp}$$

式中, C_{init} 为初始投资成本; $C_{O\&M}$ 为总运维成本; C_{rep} 为部件更换成本; C_{disp} 为报废处置成本。其中运行维护成本和更换成本按项目周期内逐年折现后计入总成本,计算过程引入折现系数将分年度支出折算为现值,完成成本模型搭建。

1.3 多元收益测算指标

结合不同应用场景的收益实现特征,将收益指标划分为直接经济收益与辅助性节约收益两类^[3]。直接经济收益为储能系统通过充放电运行直接产生的市场化收益,辅助性节约收益为系统运行过程中附带形成的成本压降。在此基础上,选取净现值、动态投资回收期作为核心评价指标,将全周期成本与逐年收益纳入折现核算框架,保障多场景经济性对比的科学性。

2 不同应用场景下超级电容储能经济性对比分析

2.1 电网调频辅助服务场景经济性核算

选取600 MW火电机组配套4 MW超级电容调频系统为测算对象,统一设置20年项目周期与4%折现率。成本层面,超级电容调频系统综合造价行业均值为300万元/MW,4 MW系统初始投资合计1200万元。年度运维成本按初始投资2.2%计取,超级电容循环寿命可达数十万次,全周期无需整体更换,仅少量辅件阶段性更新,叠加末期拆解处置费用,经折现后全寿命周期总成本现值为1462.7万元。收益层面,结合华北区域调频市场标准参数,系统调频性能系数稳定在1.4,日均有效调频里程1.2万MW,按2.4元/MW出清价格核算,年度调频服务补偿收益可观。综合调频服务收益与机组降耗收益,全周期总收益现值为2645.3万元。经测算,该场景超级电容储能项目净现值为正值,动态投资回收期约2.8年,市场化收益稳定,整体经济性优良。

2.2 轨道交通制动能量回收场景经济性核算

选取城市标准地铁中间站点配套4 MW地面式超级电容储能装置为测算对象,统一设置20年项目周期、4%折现率。成本层面,轨道交通专用兆瓦级超级电容成套系统综合造价取行业中间值280万元/MW,4 MW系统初始投资合计1120万元。年度运维成本按初始投资1.8%计取,年均20.16万元,项目全周期无需更换电容本体,每6年更换老化变流模块,叠加期末拆解处置费用,经折现后全寿命周期总成本现值为1386.5万元。收益层面,列车制动产生的富余电能经超级电容存储后供给列车起步,再生能量综合回收率稳定维持27%,站点年均回收制动电能96万kWh,每年可节约外购电费74.88万元。储能装置平抑牵引网瞬时功率峰值,站点月度最大需量下降22%,全年可减免基本电费31.2万元。项目运行末期电容金属构件回收残值按年均2.1万元折算,20年全周期总收益现值为1864.2万元。经测算,该场景超级电容储能项目净现值为477.7万元,动态投资回收期约5.6年,投资回收周期相应更长。

2.3 工业负荷削峰填谷场景经济性核算

选取某重型装备制造厂区配套4 MW超级电容

储能系统为测算对象，统一设置 20 年项目周期、4% 折现率。成本层面，工业工况专用兆瓦级超级电容成套系统综合造价取行业均值 290 万元/MW，4 MW 系统初始投资 1160 万元。年度运维成本按初始投资 1.9% 计取，年均 22.04 万元，超级电容循环寿命可完整覆盖项目周期，电容本体无需更换，仅每 7 年更换老化变流模块，叠加期末拆解处置费用，折现后全寿命周期总成本现值为 1423.9 万元。收益层面，峰谷电价差 0.52 元/kWh，年均谷充峰放电 72 万 kWh，年套利收益 37.44 万元。超级电容平抑冲压、起重设备瞬时冲击负荷，月度最大需量下降 19%，全年减免基本电费 26.8 万元。期末残值年均折算 1.9 万元，20 年全周期总收益现值 1495.6 万元。经测算，该场景超级电容储能项目净现值为 71.7 万元，动态投资回收期约 12.1 年，回收周期显著长于其他场景。

3 场景适配性分析与建议

基于三个典型场景的经济性核算与横向对比，表明不同应用场景下超级电容储能的经济特性差异显著，其适配方向应遵循技术优势充分释放、收益机制有效匹配的原则。电网调频场景中，超级电容的毫秒级响应速度与百万次循环寿命得到充分利用，辅助服务机制提供了稳定收益，经济性最优，是当前超级电容储能最宜规模化推广的方向。建议在电力辅助服务市场较为成熟的区域优先布局，采取火储联合或独立储能模式参与调频市场。轨道交通场景中，超级电容对制动能量的高效回收已实现正收益，但收益机制的缺位制约了其经济性提升。建议在地铁、轻轨等线路建设中同步配套超级电容储能系统，同步探索将再生能量纳入需求体系，拓宽收益来源。工业削峰场景中，超级电容的高功率密度优势难以充分发挥，且固定峰谷价差收益天花

板明显，独立配置经济性较差。建议该场景考虑超级电容与锂电池组成混合储能系统，由锂电池承担主要能量搬移，超级电容负责瞬时功率补偿，实现整体经济性的改善。

4 结 语

超级电容储能的经济性高度依赖应用场景与自身技术的匹配程度。本文通过构建全寿命周期成本与多元收益测算体系，明确电网调频、轨道交通和工业削峰三个典型场景的经济性排序，识别出收益机制市场化程度与循环寿命利用效率为核心影响变量。后续研究可结合储能成本持续下降趋势，动态测算不同电价、服务政策下的收益变化，深化多类型储能耦合配置的经济模型，进一步拓宽超级电容储能的落地路径。

参 考 文 献

- [1] 杨沛豪, 赵俊杰, 吴昌兵, 等. 超级电容储能系统在火电调频与电网支撑中的集成技术及应用展望[J]. 电力电容器与无功补偿, 2026, 47(2): 1-19. DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2026.02.001.
YANG P H, ZHAO J J, WU C B, et al. Integrated technologies and application prospects of supercapacitor energy storage systems in thermal power frequency regulation and grid support [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2026, 47(2): 1-19. DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2026.02.001.
- [2] 苏新凯, 赵璐璐, 陈彦桥, 等. 超级电容产业化研究与应用综述[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(8): 2994-3003.
SU X K, ZHAO L L, CHEN Y Q, et al. Review of the research on industrialization and applications of supercapacitors[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(8): 2994-3003.
- [3] 李鲁阳, 陈龙翔, 陈磊, 等. 用于新能源一次调频的储能经济配置研究[J]. 中国电力, 2024, 57(7): 54-65. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202307042.
LI L Y, CHEN L X, CHEN L, et al. Research on economic configuration of energy storage for assisting new energy in primary frequency regulation[J]. Electric Power, 2024, 57(7): 54-65. DOI:10.11930/j.issn.1004-9649.202307042.