

梯次利用电池储能系统参与用户侧削峰填谷的经济性研究

孙舟, 田贺平, 王伟贤, 潘鸣宇, 张禄

(国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075)

摘要: 针对梯次利用电池储能系统参与用户侧削峰填谷的经济性问题, 采用对比分析方法, 基于现阶段新电池和梯次利用电池在技术、经济条件上的差异, 建立基于投资回报率、投资回收期的经济性评估模型。结合实际算例, 仿真分析梯次利用电池储能系统在不同回收成本下的配置规模及其经济性, 并与新电池储能系统的容量配置及经济性进行比较分析。结果表明: 当梯次利用电池回收价分别为 0、0.2、0.4 元/Wh 时, 储能系统存在适宜配置容量使得项目投资净收益为正, 并且当储能系统持续放电时间为 8 h 时项目净现值最大, 当储能系统持续放电时间为 3 h 时投资回报率最高; 而梯次利用电池回收价为 0.6 元/Wh 时, 项目投资净收益始终为负值。

关键词: 梯次利用电池; 储能系统; 削峰填谷; 经济评估

中图分类号: TM614

文献标志码: A

0 引言

电动汽车的发展已被提升到战略高度, 根据中国国务院印发的《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)》, 到 2020 年, 纯电动汽车和插电式混合动力汽车生产能力可达 200 万辆、累计产销量超过 500 万辆, 大批量电池进入回收阶段的压力明显, 如何对退役后的动力电池进行梯次利用并获取可观的二次利用价值成为研究的重要课题。由于退役后动力电池通常具有初始容量 70% 以上的剩余容量, 并且具有一定的使用寿命, 其经过重新检测分析、筛选及配对成组, 可用于其他运行工况相对良好、对电池性能要求较低的储能领域^[1-3]。

储能技术可在电力系统发输配用各环节发挥功率支撑作用^[4-6], 基于中国电力市场环境的特点, 在峰谷价差较大地区, 传统储能技术参与削峰填谷应用已具备盈利条件, 先于其他应用模式, 凸显储能商业应用价值^[7-8]。目前将退役动力电池梯次利用于储能的研究还较少。文献[9]结合梯次利用电池储能系统, 建立了基于电动汽车快速充电站整体成本与收益的经济性评估模型, 以快速充电站年净收益最大为目标函数, 采用了改进的遗传算法对模型优化求解, 通过算例确定了梯次电池储能系统最优容量配置方案。文献[10]在研究车用淘汰电池容量和内阻特性的基础上, 分析其梯次利用于电池储能系统可能带来的更严重的电池组一致性问题。结合电池一致性评价方法, 分析了基

于电池组容量利用率的均衡判据。针对电池储能系统削峰填谷的应用特点, 提出了以电池组容量利用最大化为目标的在线均衡策略。文献[11]针对梯次利用电池储能系统在用户侧应用的经济性, 基于系统成本及效益分析, 研究了退役动力电池在用户侧参与调峰的可行性。文献[12]针对退役动力电池梯次利用的经济性问题, 提出了影响梯次利用经济性的关键参量, 包括充放电深度、电池寿命、健康状态、辅助服务等, 建立了评估梯次利用电池储能系统经济性模型。文献[13]分析了退役动力电池梯次利用的成本, 考虑储能技术经济性及市场需求, 分析了梯次利用电池储能系统在替代燃气轮机调峰电厂提供调峰服务领域的二次利用寿命。

本文主要针对电动汽车退役动力电池在用户侧削峰填谷的经济性问题, 利用梯次利用电池储能系统低储高放的特点, 降低用户电费支出, 基于新电池和梯次利用电池在技术、经济条件上的差异, 建立基于投资回报率、投资回收期的经济性评估模型。结合实际算例, 仿真分析不同回收成本下梯次利用电池储能系统的配置规模及其经济性, 并与新电池进行比较。

1 经济性评估模型

1.1 评估指标

1.1.1 投资回报率

基于储能技术经济条件, 结合目标区域峰谷电价政策,

收稿日期: 2017-04-17

通信作者: 孙舟(1976—), 男, 博士, 主要从事储能方面的研究。597443209@qq.com

在峰谷价差较大地区,储能参与削峰填谷应用已具备盈利条件,先于其他应用模式,凸显储能商业应用价值。选取投资回报率(return on investment, ROI)作为评测储能应用效益的指标,计算公式为:

$$ROI = \frac{NPV \times \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1}}{C} \times 100\% \quad (1)$$

$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{I_1^n + I_2^n - C_m^n}{(1+i)^n} - C \quad (2)$$

式中, NPV ——储能应用净收益; i ——预期投资收益率; N ——储能系统寿命年限; C ——储能系统投资成本; I_1^n ——第 n 年储能系统度电效益; I_2^n ——第 n 年储能系统容量效益; C_m^n ——第 n 年运行维护成本; i' ——投资回报率。

1.1.2 投资回收期

该指标用于衡量收回投资成本所需的时间,判断项目投资的风险。投资回收期 T 的计算公式为:

$$T = k - 1 + \frac{|NPV^{k-1}|}{NPV^k - NPV^{k-1}} \quad (3)$$

式中, k ——累计净现金流量折现值开始出现正值的年份数; NPV^k ——第 k 年累计净现金流量折现值。

1.2 效益分析

储能系统削峰填谷应用的经济效益主要体现在度电效益和容量效益。

$$I_1^n = N_{\text{day}} \sum_{t=0}^{24} \rho_t p_{\text{bess}}(t) \Delta t [1 - \sigma(n-1)] \quad (4)$$

$$I_2^n = 12\rho_r \cdot \max(p_{\text{bess}}(t)) \quad (5)$$

式中, N_{day} ——年计数天数; ρ_t ——分时电价; $p_{\text{bess}}(t)$ —— t 时刻储能功率,放电为正,充电为负; Δt ——采样时间间隔; σ ——储能电池容量衰减率; n ——储能系统使用年份; ρ_r ——容量电价。

1.3 成本分析

储能系统参与电网削峰填谷的成本主要包括初始投资成本和运行维护成本。新电池储能系统投资成本包括变流器成本和储能电池成本等,其计算公式为:

$$C_{\text{new}} = C_p P_{\text{bess}} + \frac{C_E E_{\text{bess}}}{SOC_{\text{max}} - SOC_{\text{min}}} \quad (6)$$

式中, C_{new} ——新电池投资成本; C_p ——变流器单位功率成本; P_{bess} ——储能系统功率; C_E ——单位容量成本; E_{bess} ——储能系统容量; SOC_{max} 、 SOC_{min} ——设定的储能系统荷电状态上、下限。

梯次利用电池投资成本包括退役电池回收、筛选、BMS 成本和变流器成本等。

$$C_{\text{retired}} = C_p P_{\text{bess}} + (C_{\text{re}} + C_{\text{BMS}}) E_{\text{bess}} \quad (7)$$

式中, C_{retired} ——梯次利用电池投资成本; C_{re} ——退役电池单位回收成本; C_{BMS} ——BMS 单位容量成本。

运行维护成本是为了使储能系统正常运行而对储能电池、变流器进行的定期与不定期维护、修理等。

$$C_m^n = C_{\text{um}} Q^n \quad (8)$$

式中, C_{um} ——单位放电电量运维成本; Q^n ——第 n 年储能系统放电电量。

1.4 储能系统寿命年限

考虑常规新电池储能系统、梯次利用电池储能系统的技术经济特性,结合现阶段储能应用现状^[14-17],储能系统设计寿命年限不超过 10 a,储能系统实际寿命年限计算公式为:

$$N = \min\left(\frac{\tau}{360 \times m}, 10\right) \quad (9)$$

式中, N ——储能系统寿命年限; τ ——储能系统循环次数; m ——储能系统日充放次数。

2 算例分析

2.1 算例说明

以北京某工业用户配置储能为例,储能接入电压等级为 380 V,根据北京市非居民峰谷分时电价表,分时电价见表 1 和表 2。

表 1 峰谷分时电价

Table 1 Time-of-use price

单位:元/kWh

尖峰	高峰	平段	低谷
7~8月份	10:00~15:00	07:00~10:00	
11:00~13:00	18:00~21:00	15:00~18:00	23:00~07:00
16:00~17:00		21:00~23:00	
1.0941	1.0044	0.6950	0.3946

表 2 基本电价

Table 2 Basic price

参数	最大需用/ 元·(kW·月) ⁻¹	变压器容量/ 元·(kVA·月) ⁻¹
数值	48	32

2.2 储能系统边界条件

常规新电池储能系统边界条件:电池成本为 2 元/Wh;变流器成本为 1 元/W;单位运维成本为 0.05 元/kWh;能量转换效率为 90%;容量衰减为 2%/a;循环次数为 6000 次。

梯次利用电池储能系统边界条件:回收价分别为 0、0.2、0.4、0.6 元/Wh;成组及 BMS 成本为 0.4 元/Wh;变流器成本为 1 元/Wh;单位运维成本为 0.05 元/kWh;能量转换效率为 85%

h;容量衰减为 5%/Ah;循环次数为 2000 次。

2.3 经济性分析

分别以储能项目投资净收益、投资回报率为指标,预期投资收益率为 3.5%,设定储能系统功率为 1 MW。

2.3.1 常规新电池

不同持续放电时间下常规新电池的净现值和投资回报率曲线分别如图 1 所示。由图 1 可知,2 项指标均呈先降低后升高再降低趋势,净收益最高点出现在 4 h 处,最大净收益为 224.3 万元;而投资回报率最高点出现在 1 h 处,最大投资回报率为 7.3%。这主要与峰谷分时电价及时段、储能系统充放电策略、储能系统技术经济条件、不同持续放电时间下储能系统运行寿命等因素有关。

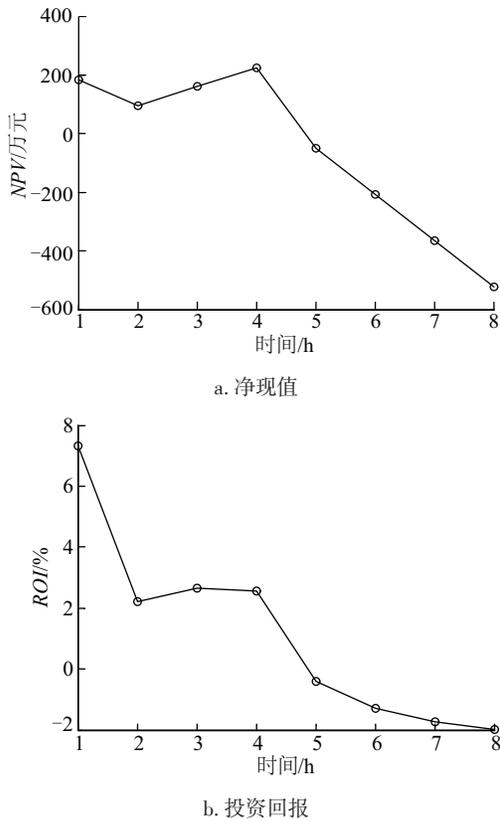


图1 新电池储能系统净现值曲线及投资回报率曲线

Fig. 1 Curve of new battery energy storage system net present value and ROI

图 2 中,新电池储能系统持续放电时间小于 3 h 时,每日完整充放电 2 次,储能寿命年限约为 8.3 a;储能系统持续放电时间大于 3 h 时,每日完整充放电次数小于 2 次,寿命延长;储能系统持续放电时间大于 6 h 时,受系统设计年限制约,寿命为 10 a。

2.3.2 梯次利用电池

不同持续放电时间下梯次利用电池的净现值和投资回报率曲线分别如图 3 所示。图 3a 中,梯次利用电池回收价分

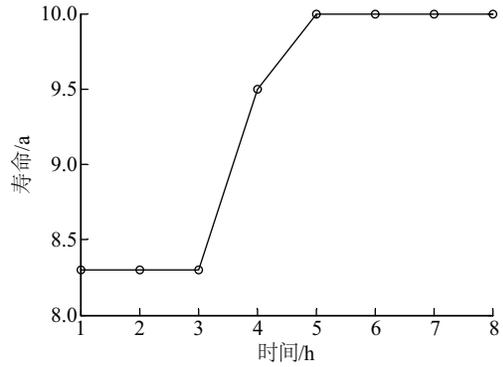


图2 新电池储能系统寿命曲线

Fig. 2 Curve of new battery energy storage system life

别为 0、0.2、0.4 元/Wh 时,储能系统存在适宜配置容量使得项目投资净收益为正,梯次利用电池回收价为 0.6 元/Wh 时,项目投资收益始终为负值。梯次利用电池净收益曲线不同于新电池净收益曲线的特征,当储能系统持续放电时间为 8 h 时项目净现值最大,分别为 440.2 万元、240.2 万元、40.2 万元。

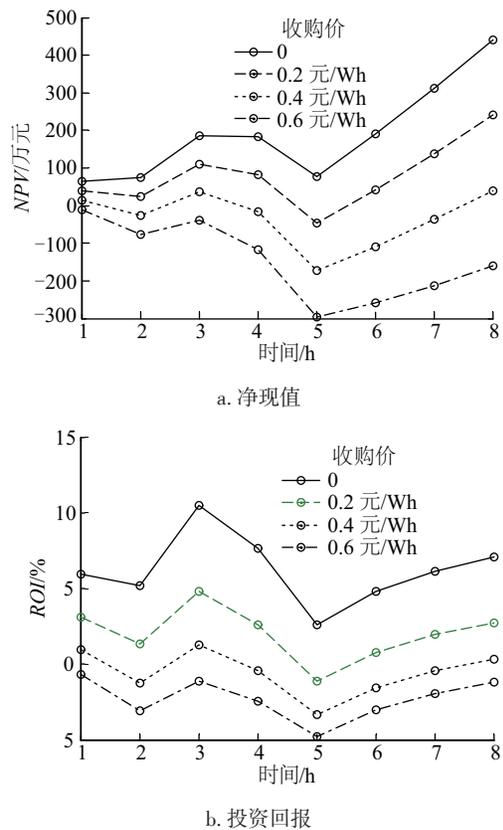


图3 梯次利用电池储能系统净现值曲线及投资回报率曲线

Fig. 3 Curve of second-use battery energy storage system net present value and ROI

图 3b 中,梯次利用电池回收价分别为 0、0.2、0.4 元/Wh 时,储能系统存在适宜配置容量使得项目投资回报率为正,

梯次利用电池回收价为 0.6 元/Wh 时,项目投资回报率始终为负值。梯次利用电池投资回报率曲线不同于新电池投资回报率曲线的特征,当储能系统持续放电时间为 3 h 时项目投资回报率最大,分别为 10.5%、4.8%、1.3%。这主要与峰谷分时电价及时段、储能系统充放电策略、梯次利用电池储能系统技术经济条件、不同持续放电时间下梯次电池储能系统运行寿命等因素有关。

图 4 中,梯次电池储能系统持续放电时间小于 3 h 时,每日完整充放电 2 次,储能寿命年限约为 2.8 a;储能系统持续放电时间大于 3 h 时,每日完整充放电次数小于 2 次,寿命延长并呈递增趋势,因而净收益曲线中持续放电时间为 8 h 时净收益最大。

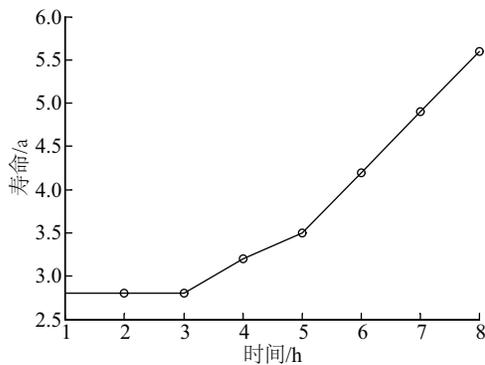


图 4 梯次利用电池储能系统寿命曲线

Fig. 4 Curve of second-use battery energy storage system life

3 结 论

1) 电动汽车的迅速发展使得大量退役动力电池的回收及二次利用问题成为研究重点。针对梯次利用电池储能系统参与用户侧削峰填谷的经济性问题,采用对比分析方法,基于现阶段新电池和梯次利用电池在技术、经济条件上的差异,对退役动力电池梯次用于用户侧削峰填谷的回收价及配置过程的持续放电时间给出合理建议。

2) 与多数评估模型不同,建立了基于投资回报率、投资回收期双重指标的经济性评估模型,分别从储能应用效益和项目投资风险 2 个角度建模,使评估模型更具合理性和代表性。

3) 算例分析表明,当新电池储能系统持续放电时间为 4 h 时净收益最大,为 224.3 万元;当持续放电时间为 1 h 时投资回报率最大,为 7.3%;当梯次利用电池回收价分别为 0、0.2、0.4 元/Wh 时,合理配置能收回成本,并且当持续放电时间为 8 h 时项目净现值最大,放电时间为 3 h 时投资回报率最高。而梯次利用电池回收价为 0.6 元/Wh 时,项目投资收益始终为负值。

[参考文献]

- [1] 李建林, 修晓青, 刘道坦, 等. 计及政策激励的退役动力电池储能系统梯次应用研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2562-2568.
LI J L, XIU X Q, LIU D T, et al. Research on second use of retired electric vehicle battery energy storage system considering policy incentive[J]. High voltage engineering, 2015, 41(8): 2562-2568.
- [2] BURKE A, MILLER M. Life cycle testing of lithium batteries for fast charging and second-use applications[C]// 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), Barcelona, Spain, 2013: 1-10.
- [3] SATHRE R, SCOWN C D, KAVVADA O, et al. Energy and climate effects of second-life use of electric vehicle batteries in California through 2050 [J]. Journal of power sources, 2015, 288(1): 82-91.
- [4] 国家电网公司“电网新技术前景研究”项目咨询组. 大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 3-8.
Consulting Group of State Grid Corporation of China. An analysis of prospects for application of large-scale energy storage technology in power systems[J]. Automation of electric power systems, 2013, 37(1): 3-8.
- [5] 李建林, 田立亭, 来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 15-25.
LI J L, TIAN L T, LAI X K. Outlook of electrical energy storage technologies under energy internet back ground[J]. Automation of electric power systems, 2015, 39(23): 15-25.
- [6] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.
ZHANG W L, QIU M, LAI X K. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power system technology, 2008, 32(7): 1-9.
- [7] 修晓青, 李建林, 惠东. 用于电网削峰填谷的储能系统容量配置及经济性评估[J]. 电力建设, 2013, 34(2): 1-5.
XIU X Q, LI J L, HUI D. Capacity configuration and economic evaluation of energy storage system for grid peak load shifting [J]. Electric power construction, 2013, 34(2): 1-5.
- [8] 薛金花, 叶季蕾, 陶琼, 等. 采用全寿命周期成本模型的用户侧电池储能经济可行性研究[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2471-2476.

- XUE J H, YE J L, TAO Q, et al. Economic feasibility of user-side battery energy storage based on whole-life-cycle cost model [J]. *Power system technology*, 2016, 40(8): 2471-2476.
- [9] 韩晓娟, 张娅, 修晓青, 等. 配置梯次电池储能系统的快速充电站经济性评估[J]. *储能科学与技术*, 2016(4): 514-521.
- HAN X J, ZHANG H, XIU X Q, et al. Economic evaluation of fast charging electric vehicle station with second-use batteries energy storage system [J]. *Energy storage science and technology*, 2016(4): 514-521.
- [10] 马泽宇, 姜久春, 文锋, 等. 用于储能系统的梯次利用锂电池组均衡策略设计[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(3): 106-111, 117.
- MA Z Y, JIANG J C, WEN F, et al. Design of equilibrium strategy of echelon use Li-ion battery pack for battery energy storage system [J]. *Automation of electric power systems*, 2014, 38(3): 106-111, 117.
- [11] LIH W C, YEN J H, SHIEH F H, et al. Second-use applications of lithium-ion batteries retired from electric vehicles: Challenges, repurposing process, cost analysis and optimal business model [J]. *International journal of advancements in computing technology*, 2012, 22(4): 518-527.
- [12] VISWANATHAN, VILAYANUR V, MICHAEL K M. Second use of transportation batteries: maximizing the value of batteries for transportation and grid services [J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2011, 60(7): 2963-2970.
- [13] NEUBAUER J, SMITH K, WOOD E, et al. Identifying and overcoming critical barriers to widespread second use of PEV batteries [EB/OL]. <http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63332.pdf>.
- [14] 李丹丹, 苏小林, 阎晓霞, 等. 储能优化配置关键问题分析[J]. *电力建设*, 2016, 37(9): 70-78.
- LI D D, SU X L, YAN X X, et al. Principal problems of energy storage optimization allocation [J]. *Electric power construction*, 2016, 37(9): 70-78.
- [15] 熊雄, 叶林, 杨仁刚. 电力需求侧规模储能容量优化和经济性分析[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(17): 42-48, 88.
- XIONG X, YE L, YANG R G. Optimal allocation and economic benefits analysis of energy storage system on power demand side [J]. *Automation of electric power systems*, 2015, 39(17): 42-48, 88.
- [16] 沈玉明, 胡博, 谢开贵, 等. 计及储能寿命损耗的孤立微电网最优经济运行[J]. *电网技术*, 2014, 38(9): 2371-2378.
- SHEN Y M, HU B, XIE K G, et al. Optimal economic operation of isolated microgrid considering battery life loss [J]. *Power system technology*, 2014, 38(9): 2371-2378.
- [17] 肖浩, 裴玮, 杨艳红, 等. 计及电池寿命和经济运行的微电网储能容量优化[J]. *高电压技术*, 2015, 41(10): 3256-3265.
- XIAO H, PEI W, YANG Y H, et al. Energy storage capacity optimization for microgrid considering battery life and economic operation [J]. *High voltage engineering*, 2015, 41(10): 3256-3265.

RESEARCH ON ECONOMY OF ECHELON UTILIZATION BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM FOR USER - SIDE PEAK LOAD SHIFTING

Sun Zhou, Tian Heping, Wang Weixian, Pan Mingyu, Zhang Lu

(State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China)

Abstract: Aiming at the economy problem of echelon utilization battery energy storage system for user-side peak load shifting application, the comparative analysis method is adopted. Based on the technical and economic difference between the new battery and echelon utilization battery, the economic evaluation model based on the return rate of investment and the payback period of investment is established. Combined with the actual example, the configuration scale and economy of battery energy storage system with different recycle cost is simulated and analyzed. It also is compared with the capacity configuration and economy of new battery energy storage system. The results show that, when the recycling price of echelon utilization battery is 0, 0.2 RMB/Wh and 0.4 RMB/Wh, respectively, by reasonable configuration, the net income of the echelon utilization energy storage system can recover the cost. And when the continuous discharge time is 8 h, the net present value is largest, while discharge time is 3 h, the return rate of investment is highest. When the recycling price of the echelon utilization battery is 0.6 RMB/Wh, the project investment net income is always negative.

Keywords: echelon utilization battery; energy storage system; peak load shifting; economic evaluation