

DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2001003

# 基于全寿命周期成本的储能成本分析

傅旭, 李富春, 杨欣, 杨攀峰

(中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075)

**摘要:** 大规模应用储能技术是提高含可再生能源电网的运行经济性和安全性的有效途径。为了合理评估储能在电网中应用的经济性, 采用全寿命周期成本方法, 根据抽水蓄能电站、压缩空气储能、铅酸电池、钠硫电池、液流电池、锂离子电池等储能成本和技术特性, 测算了各类储能的投资、年费用、度电成本, 比较了不同利用小时下各类储能的经济性。研究成果表明: 抽水蓄能电站度电成本最低, 其次是压缩空气储能, 电池类储能度电成本最高。

**关键词:** 储能; 全寿命周期; 度电成本; 抽水蓄能电站; 压缩空气储能; 锂离子电池

中图分类号: TK 02 文献标志码: A

## Cost Analysis of Energy Storage Based on Life Cycle Cost

FU Xu, LI Fuchun, YANG Xin, YANG Panfeng

(Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, Shaanxi Province, China)

**ABSTRACT:** The large-scale application of energy storage technology is an effective way to improve the economic performance and safety of the power grid containing renewable energy. In order to reasonably evaluate the economy of energy storage in the power grid, the life cycle cost method is adopted, according to the energy storage cost and technical characteristics of pumped storage power station, such as compressed air storage, lead-acid battery, sodium sulfur battery, liquid flow battery, lithium ion battery, etc. The investment, annual cost and electricity cost of various kinds of energy storage are calculated, and the economy of various types of energy storage under different utilization hours is compared. The research results show that the minimum cost of electricity storage for pumped storage power station is the lowest, followed by compressed air energy storage, and the highest energy cost of battery energy storage.

**KEY WORDS:** energy storage; life cycle; electricity cost; pumped storage power station; compressed air energy storage; lithium ion battery

## 0 引言

随着能源和环境问题的日益严重,研究和开发可再生能源已成为全球共同关注的热点<sup>[1-4]</sup>。大规模储能技术既是解决可再生能源并网利用的关键,也是提高电网运行经济性和安全性的有效途径,将改变电能生产、输送和使用同步完成的模式,弥补现有电力系统中缺失的“储放”功能,达到优化电力资源配置、提高电能质量、促进可再生能源利用目的。决定储能技术应用和产业发展的因素中,成本是一个最重要的参数<sup>[5-6]</sup>。近十年来,锂离子电池成本下降迅速,研究人员对储能成本和经济性进行了大量的研究<sup>[7-10]</sup>。

国际上通常采用度电成本作为储能成本评价指标。文献[11]以抽水蓄能为研究对象,建立了储能度电成本的评价模型,分析了影响储能技术度电成本的敏感性因素。文献[12]在峰谷套利和电网调频应用场景下,研究了采用锂离子电池储能的可行性。文献[13]以储能在用户侧的收益和投资风险为研究对象,建立了用户侧储能的全生命周期成本模型。文献[14-15]对风光储系统中储能装置的应用场景进行了探讨。文献[16-17]基于模型预测控制研究了储能控制策略,在控制过程中均引入电池充电状态等参数。

本文根据当前各类储能成本的价格和技术特

性,测算各类储能的投资、年费用、度电成本,比较不同利用小时下各类储能的经济性。

## 1 储能成本分析

国际电工委员会制定的 IEC 60300-3-3 标准指出,全寿命周期成本(life cycle cost, LCC)是指在整个系统的寿命周期内,设计、研制、投资、购置、运行、维护、回收等过程中发生的或可能发生的一切直接的、间接的、派生的或非派生的费用的总和。本文借鉴全寿命周期成本理论建立储能成本模型,利用度电成本分析储能经济性。

### 1.1 投资成本

初始投资成本是指储能系统工程投建初期一次性投入的固定资金,通常用于主要设备的购置等,计算公式为

$$C_{\text{In}} = C_{\text{P}}P_{\text{ESS}} + C_{\text{E}}E_{\text{ESS}} \quad (1)$$

式中: $P_{\text{ESS}}$ 、 $E_{\text{ESS}}$  分别为储能的功率和容量; $C_{\text{P}}$ 、 $C_{\text{E}}$  分别储能的功率和容量的单位投资。

等年值系数  $C(r, n)$  表示为

$$C(r, n) = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (2)$$

式中: $r$  为基准折现率; $n$  为储能运行的期限(寿命),年。

考虑资金的时间价值,对储能的投资成本进行修正,则折算到每年的成本费用  $C_{\text{In}}$  可修正为:

$$C_{\text{In}} = C(r, n)(C_{\text{P}}P_{\text{ESS}} + C_{\text{E}}E_{\text{ESS}}) \quad (3)$$

### 1.2 运维成本

运行维护成本是指为保障储能系统在寿命期内正常运行而动态投入的资金,通常包括储能系统的试验、安装、损耗、停运、人力、检修和维修等费用,以年为单位,计算公式为

$$C_{\text{OM}} = K_{\text{O}}P_{\text{ESS}} + K_{\text{M}}Q_{\text{ESS}} \quad (4)$$

式中: $K_{\text{O}}$  为储能的单位功率年运行维护成本系数; $K_{\text{M}}$  为储能的单位容量年运行维护成本系数; $Q_{\text{ESS}}$  为储能的年发电量。

在上述储能的年运行成本系数和年维护成本系数不易确定时,运行维护费一般按初始投资的一定比例近似估算,即

$$C_{\text{OM}} = \mu C_{\text{In}} \quad (5)$$

式中: $\mu$  为储能的运行维护费用系数。

综上,储能电站的年成本费用为

$$C_{\text{ESS}} = C_{\text{In}} + C_{\text{OM}} \quad (6)$$

### 1.3 度电成本

根据储能电站的全寿命周期成本,结合储能电站的年发电量,可计算储能电站的度电成本,计算公式为

$$c_{\text{ESS}} = \frac{C_{\text{ESS}}}{Q_{\text{ESS}}} = \frac{C_{\text{In}} + C_{\text{OM}}}{\eta P_{\text{ESS}} H_{\text{ESS}}} \quad (7)$$

式中: $c_{\text{ESS}}$  为储能电站的度电成本; $\eta$  为储能电站的转换效率; $P_{\text{ESS}}$  为储能电站的装机容量; $H_{\text{ESS}}$  为储能电站的储电年利用小时数。

## 2 各类储能电站度电成本分析

对几种典型储能电站的度电成本进行测算,比较各类储能设备的经济性,考虑的储能设备包括抽水蓄能电站,压缩空气储能、铅酸电池、钠硫电池、液流电池、锂离子电池,其基本参数见表 1。

表 1 储能电站参数

比较项目	抽水蓄能	压缩空气	铅酸电池	钠硫电池	液流电池	锂离子
单位功率投资/ (元·kW <sup>-1</sup> )	5 500	7 100	—	—	—	—
单位容量投资/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	—	—	1 200	7 000	8 000	2 000
建设期/a	7	2	1	1	1	1
设备寿命/a	30	30	—	—	—	—
最大充放电次数	—	—	280	2 500	12 000	3 000
运行维护费率/%	2.50	2.00	0.50	0.50	0.50	0.50
电能转换效率/%	75	40	80	85	70	90

以目前较为成熟的抽水蓄电站为基准,储能装机按 1 200 MW,储能时长按 6 h,计算中电池使用寿命暂按储能放电深度 80% 情况下,1 年循环 300 次,液流电池循环次数达 12 000 次以上,计算中按 20 年计列。

储能电站投资如表 2 所示,储能电站度电成本测算结果见表 3 和图 1,可以看出:

(1) 按上述参数计算,抽水蓄电站的度电成本最低,其次是压缩空气,电池类储能度电成本最高,其中电池类储能度电成本由低到高依次为锂离子电池、液流电池、钠硫电池和铅酸电池。

(2) 若储能电站的储能利用小时数达到 1 000 h,抽水蓄电站储能度电成本低于 1 元/(kW·h),约 0.93 元/(kW·h),压缩空气储能度电成本约

表2 各类储能电站的投资比较

Table 2 Investment of various energy storage stations

比较项目	抽水蓄能	压缩空气	铅酸电池	钠硫电池	液流电池	锂离子电池
储能投资/(10 <sup>8</sup> 元)	66	85.2	86.4	504	576	216
使用寿命/a	30	30	1	8	20	10
投资等年值/(10 <sup>8</sup> 元)	6.71	7.17	98.00	88.16	55.67	21.33
运行维护费/(10 <sup>8</sup> 元)	1.65	1.70	0.43	2.52	2.88	0.72
综合成本/(10 <sup>8</sup> 元)	8.36	8.88	98.43	90.68	58.55	22.05
转换效率/%	75	40	80	85	70	90

表3 各类储能电站的年发电量和度电成本

Table 3 Annual generation and cost of unit electric quantity for various energy storage stations

发电小时/h	储能年发电量/(10 <sup>8</sup> kW·h)						储能度电成本/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]					
	抽水蓄能	压缩空气	铅酸电池	钠硫电池	液流电池	锂离子电池	抽水蓄能	压缩空气	铅酸电池	钠硫电池	液流电池	锂离子电池
200	1.8	0.96	1.92	2.04	1.68	2.16	4.64	9.25	51.27	44.45	34.85	10.21
400	3.6	1.92	3.84	4.08	3.36	4.32	2.32	4.62	25.63	22.22	17.43	5.10
600	5.4	2.88	5.76	6.12	5.04	6.48	1.55	3.08	17.09	14.82	11.62	3.40
800	7.2	3.84	7.68	8.16	6.72	8.64	1.16	2.31	12.82	11.11	8.71	2.55
1000	9.0	4.8	9.6	10.2	8.4	10.8	0.93	1.85	10.25	8.89	6.97	2.04
1200	10.8	5.8	11.5	12.2	10.1	13.0	0.77	1.54	8.54	7.41	5.81	1.70
1400	12.6	6.7	13.4	14.3	11.8	15.1	0.66	1.32	7.32	6.35	4.98	1.46
1600	14.4	7.7	15.4	16.3	13.4	17.3	0.58	1.16	6.41	5.56	4.36	1.28
1800	16.2	8.6	17.3	18.4	15.1	19.4	0.52	1.03	5.70	4.94	3.87	1.13
2000	18.0	9.6	19.2	20.4	16.8	21.6	0.46	0.92	5.13	4.44	3.49	1.02

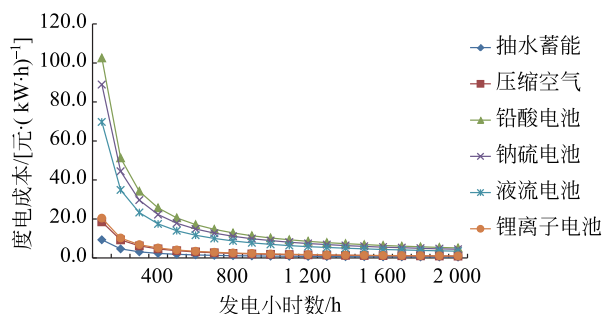


图1 储能电站度电成本曲线

Fig. 1 Energy cost curve of energy storage

1.85元/(kW·h),锂离子电池储能度电成本约2.04元/(kW·h);若储能电站的储能利用小时数达到2000h,抽水蓄能度电成本低于0.5元/(kW·h),约0.46元/(kW·h),压缩空气储能度电成本低于1元/(kW·h),约0.92元/(kW·h),锂离子电池储能度电成本降低至约1.02元/(kW·h)。

对除抽水蓄电站外的其他储能型式相关参数进行敏感性分析,若未来压缩空气单位投资降低至与抽水蓄电站投资相当,电能转换效率提高至65%;电池类储能的单位投资降低50%,锂离子电池循环寿命达到5000次,储能电站的度电成本测算结果见

表4和图2。可以看出:

(1) 按上述参数计算,抽水蓄能电站和压缩空气的度电成本基本相当,主要原因是压缩空气建设周期较短导致年费用较低,电池类储能度电成本最高,其中电池类储能度电成本由低到高依次为锂离子电池、液流电池、钠硫电池和铅酸电池。

(2) 若储能电站的储能利用小时数达到1000h,压缩空气储能度电成本低于1元/(kW·h),约0.88元/(kW·h),锂离子电池储能度电成本约0.79元/(kW·h);若储能电站的储能利用小时数达到2000h,压缩空气储能度电成本低于0.5元/(kW·h),约0.44元/(kW·h),锂离子电池储能度电成本低于0.5元/(kW·h),约0.39元/(kW·h)。

需要说明的是,储能应用于不同场景,运用方式也不一样,对于目前应用较多的用户侧储能来说,由于负荷曲线基本固定,储能运行方式明确,每天可以按照基本相同策略运行,利用效率比较高,东部部分地区储能年利用小时数在2000h左右,储能度电成本相对较低,再加上峰谷电价差相对较高,储能存在盈利空间;但对于发电侧储能应用与

表4 各类储能电站的年发电量和度电成本(敏感性分析)

Table 4 Annual generation and cost of unit electric quantity for various energy storage stations (sensitivity analysis)

发电小时/h	储能年发电量/(10 <sup>8</sup> kW·h)						储能度电成本/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]					
	抽水蓄能	压缩空气	铅酸电池	钠硫电池	液流电池	锂离子电池	抽水蓄能	压缩空气	铅酸电池	钠硫电池	液流电池	锂离子电池
200	1.8	0.96	1.92	2.04	1.68	2.16	4.64	4.41	25.63	22.22	17.43	3.94
400	3.6	1.92	3.84	4.08	3.36	4.32	2.32	2.20	12.82	11.11	8.71	1.97
600	5.4	2.88	5.76	6.12	5.04	6.48	1.55	1.47	8.54	7.41	5.81	1.31
800	7.2	3.84	7.68	8.16	6.72	8.64	1.16	1.10	6.41	5.56	4.36	0.99
1 000	9.0	4.8	9.6	10.2	8.4	10.8	0.93	0.88	5.13	4.44	3.49	0.79
1 200	10.8	5.76	11.52	12.24	10.1	13.0	0.77	0.73	4.27	3.70	2.90	0.66
1 400	12.6	6.72	13.44	14.32	11.8	15.1	0.66	0.63	3.66	3.17	2.49	0.56
1 600	14.4	7.68	15.36	16.32	13.4	17.3	0.58	0.55	3.20	2.78	2.18	0.49
1 800	16.2	8.64	17.28	18.24	15.1	19.4	0.52	0.49	2.85	2.47	1.94	0.44
2 000	18.0	9.6	19.2	20.16	16.8	21.6	0.46	0.44	2.56	2.22	1.74	0.39

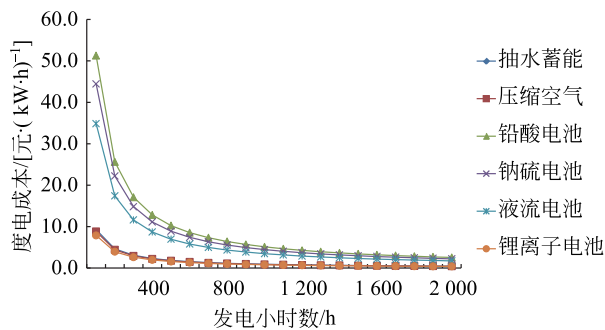


图2 储能电站度电成本曲线(敏感性分析)

Fig. 2 Energy cost curve of energy storage power station (sensitivity analysis)

减少新能源弃电场景,由于弃电不是每天都会发生,弃电大小也不一样,所以储能应用于此场景,利用率明显较低,初步测算,西北区域储能应用年利用小时数在1 000 h左右,所以储能度电成本明显较高,储能盈利模式尚需进一步研究。

### 3 结论

基于全寿命周期成本理论,计算了各类储能装置的成本和度电成本,研究表明抽水蓄能电站度电成本最低,其次是压缩空气储能,电池类储能度电成本最高,其中电池类储能度电成本由低到高依次为锂离子电池、液流电池、钠硫电池和铅酸电池。近几年锂离子电池成本下降较快,未来锂离子电池成本进一步下降后,初步测算储能年利用小时数能够达到1 500 h以上,度电成本将低于0.50元/(kW·h)。

### 参考文献

[1] 姜素华,易林,吴耀武,等.基于可变寿命模型的电池储能容

量优化配置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 265-271.

LOU Suhua, YI Lin, WU Yaowu, et al. Optimizing deployment of battery energy storage based on lifetime prediction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 265-271.

[2] 孙振新,刘汉强,赵喆,等.储能经济性研究[J].中国电机工程学报, 2013, 33(S): 54-58.

[3] 丁明,徐宁舟,林根德,等.电池储能电站静态功能的研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 242-248.

DING Ming, XU Ningzhou, LIN Gende. Static function of the battery energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 242-248.

[4] 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 Jinhua, YE Jilei, TAO Qiong, 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.

[5] 赵晶晶,李振坤,朱兰,等.储能系统在微网中的优化配置与成本分析[J]. 华东电力, 2011, 39(10): 1615-1618.

ZHAO Jingjing, LI Zhenkun, ZHU Lan, et al. Optimal allocation and cost analysis of energy storage system in micro grid. [J]. East China Electric Power, 2011, 39(10): 1615-1618.

[6] 朱永强,郝嘉诚,赵娜,等.能源互联网中的储能需求、储能的功能和作用方式[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(2): 69-75.

ZHU Yongqiang, HAO Jiacheng, ZHAO Na, et al. Demands, functions and action manners of energy storage in energy internet[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(2): 69-75.

[7] 闫俊辰.一种基于“能量”成本的储能技术评价新方法[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(2): 269-275.

YAN Junchen. An evaluation method of energy storage

- technologies based on energetic costs [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2019, 8(2): 269-275.
- [8] 李建林, 修晓青, 吕项羽, 等. 储能系统容量优化配置及全生命周期经济性评估研究综述[J]. *电源学报*, 2018, 16(4): 1-13.
- LI Jianlin, XIU Xiaoqing, LV Xiangyu, et al. Review on capacity optimization configuration and life cycle economic evaluation method for energy storage system [J]. *Journal of Power Supply*, 2018, 16(4): 1-13.
- [9] 王海华, 陆冉, 曹炜, 等. 规模风电并网条件下储能系统参与辅助调峰服务容量配置优化研究[J]. *电工电能新技术*, 2019, 38(6): 42-49.
- WANG Haihua, LU Ran, CAO Wei, et al. Optimal capacity allocation of energy storage system participating auxiliary peak regulation in large-scale wind power integration [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2019, 38(6): 42-49.
- [10] 苏伟, 钟国彬, 徐凯琪, 等. 储能技术经济性评估方法综述 [J]. *广东电力*, 2019, 32(1): 29-35.
- SU Wei, ZHONG Guobin, XU Kaiqi, et al. Review of evaluation method for economy of energy storage technology [J]. *Guangdong Electric Power*, 2019, 32(1): 29-35.
- [11] POONPUN P, JEWELL W T. Analysis of the cost per kilowatt hour to store electricity [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, 23(2): 529-534.
- [12] 刘坚. 储能技术经济性现状及商业化运行障碍[J]. *中国能源*, 2017, 39(7): 36-40.
- [13] 潘福荣, 张建赟, 周子旺, 等. 用户侧电池储能系统的成本效益及投资风险分析[J]. *浙江电力*, 2019, 38(5): 43-49.
- PAN Furong, ZHANG Jianyun, ZHOU Ziwan, et al. Cost-benefit and investment risk analysis of user-side battery energy storage system [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2019, 38(5): 43-49.
- [14] LI X J, YAO L Z, HUI D. Optimal control and management of large-scale battery energy storage system to mitigate the fluctuation and intermittence of renewable generations [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2016, 4(4): 593-603.
- [15] LI X J, HUI D, LAI X K. Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 4(2): 464-473.
- [16] LEI M Y, YANG Z L, WANG Y B, et al. Design of energy storage control strategy to improve the PV system power quality [C]//IECON2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Florence: IEEE, 2016; 2022-2027.
- [17] 单茂华, 李陈龙, 梁廷婷, 等. 用于平滑可再生能源出力波动的电池储能系统优化控制策略(英文)[J]. *电网技术*, 2014, 38(2): 469-477.
- SHAN Maohua, LI Chenlong, LIANG Tingting, et al. A real-time optimal control strategy for battery energy storage system to smooth active output fluctuation of renewable energy sources [J]. *Power System Technology*, 2014, 38(2): 469-477 (in English).



傅旭

收稿日期:2020-01-08

作者简介:

傅旭(1976),男,博士,高级工程师,注册咨询工程师,主要从事电力系统规划分析方面的研究工作, fuxu@nwepdi.com;

李富春(1982),男,高级工程师,从事电力系统规划设计研究工作;

杨欣(1991),女,工程师,从事电力系统规划设计研究工作;

杨攀峰(1962),男,教授级高级工程师,从事电力系统规划设计研究工作。