

框架式重力储能度电化净现值分析

徐志强^{1,✉}, 李峻¹, 张春琳¹, 洪剑锋²

(1. 中能建数字科技集团有限公司, 北京 100022;

2. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

摘要: [目的] 框架式重力储能系统因其具有高经济效益、低系统成本、不受地理条件限制等特点而具有广泛的应用前景。[方法] 文章运用平准化度电净现值 (levelized net present value of electricity, LNPVE) 模型详细探究了框架式重力储能系统在整个生命周期中的收益变化规律。以重力储能系统中资金流动的净现值为基础, 构建了包括系统初始投资、折现率、上网电价以及政府补贴等的系统折现度电收入模型 (levelized revenue of electricity, LROE), 利用折现度电收入 LROE 与度电成本 (levelized cost of electricity, LCOE) 建立了平准化度电净现值模型, 并探究了系统的折现率、上网电价、系统寿命以及系统充放电效率变化时 LCOE、LROE、LNPVE、总净现值收入、总折现成本的变化情况, 综合考虑不同参数对系统经济性的影响。[结果] 折现率、系统寿命、上网电价和充放电效率的增大都会改善系统的经济性。此外, 随着系统寿命的增加, 系统的 LNPVE 减小而总净现值收入增加, 在评估系统的经济性时综合考虑多方因素更为恰当。[结论] 研究的度电净现值模型可以为框架式重力储能系统的建设和收益分析提供参考。

关键词: 重力储能; 框架式; 度电净现值模型; 度电成本; 经济性

中图分类号: TK02; TM619

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)

OA: <https://www.energychina.press/>

Levelized Net Present Value of Electricity Analysis of Frame Gravity Energy Storage System

XU Zhiqiang^{1,✉}, LI Jun¹, ZHANG Chunlin¹, HONG Jianfeng²

(1. China Energy Digital Technology Group Co., Ltd., Beijing 100022, China;

2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: [Introduction] The frame gravity energy storage system has a wide range of application prospects due to its high economic benefits, low system costs, and unrestricted geographical conditions. [Method] The paper studied the profit variation rules of the frame gravity energy storage system throughout its life cycle in detail by applying the leveled net present value of electricity (LNPVE) model. The paper, based on the net present value of capital flow in gravity energy storage systems, first built a levelized revenue of electricity (LROE) model which includes initial investment, discount rate, feed-in tariff, and government subsidies; then, built the LNPVE model on the basis of the LROE model and the levelized cost of electricity (LCOE) model; and finally explored the changes of LCOE, LROE, LNPVE, total net present value income and total discounted cost when the discount rate, feed-in tariff, service life and charge-discharge efficiency of the system change, to comprehensively consider the impact of different parameters on the economic efficiency of the system. [Result] The increase in the discount rate, service life, and charge-discharge efficiency of the system will improve the economic efficiency of the system. In addition, as the service life of the system increases, the LNPVE of the system decreases while the total net present value income increases. Therefore, it is more appropriate to comprehensively consider multiple factors when evaluating the economic efficiency of the system. [Conclusion] The LNPVE model studied here can provide a reference for the construction and profit analysis of frame gravity energy storage systems.

Key words: gravity energy storage system; frame gravity energy storage system; LNPVE mode; LCOE; economic efficiency

收稿日期: 2024-05-06 修回日期: 2024-06-29

基金项目: 中国能源建设股份有限公司科技项目 (CEEC2022-ZDYF-06)

0 引言

随着各种分布式能源接入电网,其间歇和波动的特性大大影响了大电网的整体稳定性,而作为一种可以被调配的资源——储能系统可以作为大电网与分布式能源之间的缓冲地带,如电化学储能、抽水蓄能等都为维持电网稳定性发挥了很大的作用,据预测^[1],在2024年储能系统的收益将由十年前的4.52亿美元增长至165亿美元,其涨幅高达3650%。重力储能作为一种新兴的储能技术得到了广泛的应用及发展^[2-3],其相对于其他储能技术具有很多的优势,如清洁无污染,建设方便,不需要考虑复杂的地理条件,损耗小等优点。

目前,针对重力储能系统经济性分析的研究主要集中在成本核算方面^[4-9],而对系统收益研究较少。文献[4]对框架式重力储能系统的结构成本进行了详细分析,但未对系统收益进行研究;文献[5-9]中建立了重力储能系统的度电化成本LCOE模型,以此分析系统的经济性,但缺少系统的收益分析。在储能系统收益分析研究中,文献[10-11]对系统不同配置进行了分析,结果表明多储能系统配置方案经济效益优于单一发电方案。文献[12-13]分析了不同结算电价对收益的影响,研究表明:当分时综合电价小于供电局综合电价时,选择分时抵消光伏综合电价作为结算电价经济性较好。将上网电价、政策补贴与LCOE模型组合得到的LNPVE模型在近期被提出^[14-17],其在LCOE的基础上分析系统的度电化收益,且已在一些能源系统中被应用,文献[14-17]建立了光伏系统的LNPVE模型,并探究了系统收益的影响因素。其中,文献[14-15]建立了单一光伏系统的LCOE模型和LNPVE模型,并以此分析了系统的收益和成本,研究认为影响光伏项目长期经济稳定性的首要因素是政策因素,其次是技术因素,再者是经济因素;文献[16-17]建立了光伏发电-储能联合系统的LCOE模型和度电化净现值LNPVE模型,并分析了经济因素、政治因素和财务因素对系统经济效益的影响。与LNPVE模型类似的有NPV(net present value)^[18-20]模型,它们都是体现收入和支出之间不同经济指标的,但与NPV不同的是,LNPVE模型针对性地考虑了系统上网电量对系统收益的影响,其基于上网电量而得到的系统度电化净现值既可以与系统度电化成本进行对应,也可以更细致地评估

系统的经济性,因此使用LNPVE模型是有必要的。

综上所述,目前的研究已对重力储能的成本进行了深入分析,而对系统的收益进行分析的研究较少,且考虑因素较少。针对这一研究不足,文章通过分析重力储能系统的平准化度电成本(LCOE)和平准化度电净现值(LNPVE)来评估系统的收益情况,基于此可对整个重力储能系统的经济性和可行性有更加深入的了解和判断。

1 LNPVE 分析原理与过程

1.1 重力储能原理分析

以框架式重力储能系统为例,研究系统的发电过程。其结构图如图1所示。框架式重力储能由提升下放装置和整体框架结构组成,整体框架结构其中包含多个通道。在储能时,由提升下放装置提升重物储存能量,释能时,由提升下放装置将重物下放释放能量发电。

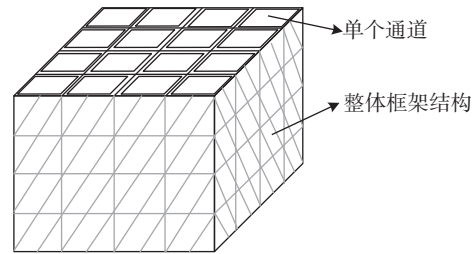


图1 重力储能结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gravity energy storage structure

在重物块下降过程中,根据重物下降速度的不同可以将下落过程分为:加速下降,匀速下降、匀减速下降3个阶段。由此建立单个重物下落过程的运动模型,如图2所示。

在重物块匀速下降阶段中系统可以发出稳定的电能,该电能可满足电网电能质量要求;而在加速下落和减速下落过程中,系统发出的电能不稳定,此时,为了使系统发出的电能满足并网要求,可对不同通道重物块的加减速运行轨迹进行协同控制。

由图2中重物运动状态,结合运动学基本关系式,可得到重物下降功率表达式,见式(1)。

$$P = Fv = \begin{cases} m(g - a_1)a_1t & 0 < t \leq t_1 \\ mgv_1 & t_1 < t \leq t_1 + t_2 \\ m(g + a_3)(v_1 - a_3(t - t_1 - t_2)) & t_1 + t_2 < t \leq T \end{cases} \quad (1)$$

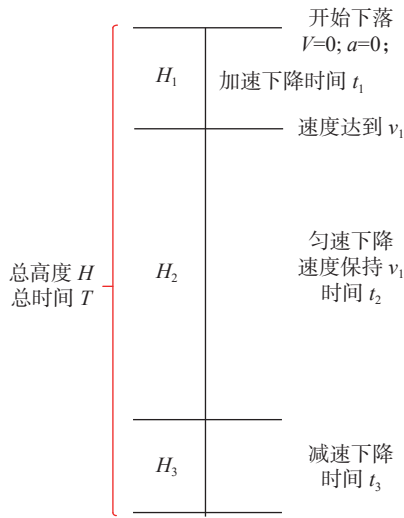


图 2 重物下落运动状态的简化示意图

Fig. 2 A simplified diagram of the falling motion of a heavy object

式中:

- F ——重物受到的力(N);
- v ——重物的速度(m/s);
- m ——重物的质量(kg);
- g ——重物的加速度(m/s^2);
- P ——功率(W);
- a_1, a_3 ——加速段和减速段的加速度(m/s^2);
- t_1, t_2 ——重物在 H_1, H_2 段下降所需时间(s);
- T ——重物总下降时间(s)。

根据式(1)得到系统的功率曲线,如图3所示。

与公式(1)对应,当重物块处于加速下降与匀速下降交界、匀速下降与减速下降交界时,重物块受到的力发生了变化,加速度随之突变,功率也随之会发生突变。当重物位于第二阶段匀速下降时,其发出的功率是稳定的,而在加速下落和减速下落阶段中随着速度的变化,其功率也在逐渐变化。

重物下落过程中整体能量可表示为式(2):

$$\bar{P}T = mg(H_1 + H_2) - \frac{1}{2}mv_1^2 \quad (2)$$

式中:

\bar{P} ——重物下落一次的平均输出功率(W)。

式(2)代表了重物在下落过程中的整体能量,由该值可推导出重物质量。因重物块只在下降至 H_3 高度前释放能量,因此其高度只需要计算 H_1 与 H_2 即可,而 $\frac{1}{2}mv_1^2$ 为系统在第二阶段维持重物块匀速下降时所做的功,因此需要从重物块的重力势能中减去。

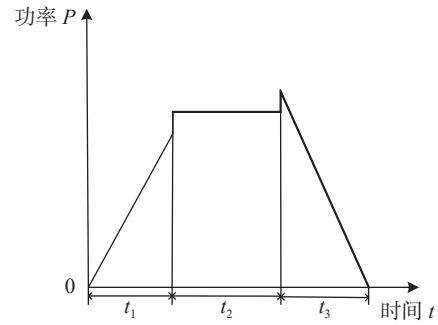


图 3 系统功率曲线

Fig. 3 Power curve of the system

给电网输入波动的功率会造成电网失稳,因此在本系统中只输出重物块匀速下落阶段的平稳功率,基于此,电机单次发电量可以由式(3)表示,可为后续计算重物发电量来评估所提方案是否接近预期的发电量水平提供参考。

$$P_G t_2 = mgH_2 \quad (3)$$

式中:

P_G ——重物匀速下落阶段发出的平稳功率(W)。

1.2 LNPVE 原理分析

在重力储能系统中,平准化度电成本(LCOE)的估算对系统的各项成本和输出电量进行表征,为了分析系统收益对系统经济性影响,构建了平准化度电净现值模型(LNPVE),该模型考虑了上网电价与储能电价补贴因素影响。

LNPVE 中净现值(NPV)是指未来资金(现金)流入(收入)现值与未来资金(现金)流出(支出)现值的差额。将储能系统未来流入和流出的资金都转换成各期的现值后,以估计折现率计算,即可得出净现值。其中,以企业最低投资报酬率为基准设定的预估贴现率,是企业可以接受的标准。如果净现值为正,那么该系统设计就是可行的,且系统的净现值越大,储能系统的投资收益越好。其中,评估净现值的数学模型可由下式表示:

$$NPV = \sum \frac{R_t}{(1+r)^t} - C_{total} \quad (4)$$

式中:

R_t ——系统第 t 年的收入(元);

r ——折现率;

t ——系统的运行时间(a)。

C_{total} ——系统的总折现成本(元)。可由式(5)

表示:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{inv}} + \sum_{t=0}^N \frac{C_{\text{OM}} + C_{\text{R}} + C_{\text{C}} + C_{\text{Rec}}}{(1+r)^t} \quad (5)$$

式中:

C_{inv} ——重力储能系统的初次投资建设成本(元);

C_{OM} ——系统的年度运行维护成本(元);

C_{R} ——系统的置换成本即替换老化元器件或者因意外损坏的元器件(元);

C_{C} ——系统的购电成本(元);

C_{Rec} ——回收成本,即在系统寿命结束时,拆除系统所产生的费用和系统残值的差(元)。

年度运行维护成本和年购电成本可由式(6)~(7)表示。

$$C_{\text{OM}} = C_{\text{E}} + C_{\text{P}} + C_{\text{r}} \quad (6)$$

$$C_{\text{C}} = U_{\text{C}} N_{\text{y}} Q_{\text{C}} = U_{\text{C}} N_{\text{y}} Q_{\text{E}} \theta_{\text{DOD}} / \eta \quad (7)$$

式中:

C_{E} ——基于能源的维护成本,与储能容量有关(元), $C_{\text{E}} = U_{\text{E}} Q_{\text{E}}$;

U_{E} ——单位储能容量维护成本(元/MW·h);

Q_{E} ——储能容量(MW·h);

C_{P} ——基于电力的维护成本,与装机容量有关(元), $C_{\text{P}} = U_{\text{P}} W_{\text{P}}$;

U_{P} ——单位功率成本(元/MW);

W_{P} ——装机容量(MW);

C_{r} ——人工成本(元);

U_{C} ——购电电价(元);

N_{y} ——购电次数;

Q_{C} ——购电量(kWh);

Q_{E} ——储能容量(kWh);

θ_{DOD} ——放电深度;

η ——系统效率。

重力储能项目的经济效益主要来源于售电收入和其他政府补贴。售电收入主要是利用电价差来获得,通过在电网的电价较低时购入电力,再利用储能系统储存,当电价较高时售出。补贴收入主要为政府为储能电站的建设和运营提供补贴,其包括建设补贴和运营补贴。经济效益计算见下式:

$$R = R_{\text{e}} + R_{\text{s}} = \sum_{t=0}^N \frac{E_t \times (U_{\text{C}_t} + S_t)}{(1+r)^t} \quad (8)$$

式中:

R_{e} ——重力储能系统向外部售电的收入(元);

R_{s} ——政府等提供给储能系统的补贴(元);

U_{C_t} ——第 t 年所售电的平均价格(元/kWh);

S_t ——第 t 年储能补贴标准(元/kWh);

E_t ——第 t 年储能系统输出的电量(kWh)。

我国储能系统的补贴标准是在正常电价的基础上每发 1 kWh 电能给予一定量的补贴,根据各地政策而不同。

在进行重力储能项目的经济效益评估时,不直接将其净现值假设为零。相反,将储能项目的收入表述为特定价格与输出电量的乘积,并将这个特定的价格定义 LROE,即式(9):

$$\sum_{t=0}^N \frac{\text{LORE}_t \times E_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^N \frac{R_t}{(1+r)^t} \quad (9)$$

式中:

LORE_t ——第 t 年的 LROE(元/kWh);

R_t ——第 t 年的收入(元)。

特定价格 LROE 可以看作是根据 LCOE 的原理所类推得到的,定义其为储能项目的折现度电收入,代入上述效益参数,即可得:

$$\text{LORE} = \frac{\sum_{t=0}^N \frac{E_t \times (U_{\text{C}_t} + S_t)}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^N \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (10)$$

进一步定义平准化度电净现值为折现度电收入与平准化度电成本之差,再代入成本参数,可以得到平准化度电净现值的数学模型,即:

$$\text{LNPVE} = \text{LORE} - \text{LCOE} = \frac{\sum_{t=0}^N \frac{R_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^N \frac{E_t}{(1+r)^t}} - \frac{C_{\text{total}}}{\sum_{t=0}^N \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (11)$$

式中:

LNPVE——储能系统的平准化度电净现值(元/kWh),它是衡量储能系统净现值的指标。

总折现发电量可由式(12)表示:

$$E_{\text{total}} = \sum_{t=0}^N \frac{E_t}{(1+r)^t} \quad (12)$$

2 LNPVE 计算案例

2.1 系统参数设置

重力储能系统建成后,可以起到在电网中削峰

填谷的作用,且其高效无污染的特性也使其对环境的影响降到最小,重力储能与光伏发电均属于新能源系统,参考文献 [14, 16] 中政府对光伏发电的补贴标准可参考得到重力储能的实际上网电价,如表 1 所示。

表 1 实际上网电价参数

Tab. 1 Actual feed-in tariff parameters

电价组成	第1~5年	第6~10年	第11~25年	26年及以后
燃煤发电				
重力储能上网电价/发电标杆 [元·(kWh) ⁻¹]	0.398 1	0.398 1	0.398 1	0.398 1
电价价格内补贴/ [元·(kWh) ⁻¹]	0.581 9	0.500 0	0.450 0	0.400 0
重力储能发电省市补贴	0.5	0.25	0	0
实际上网电价	1.480 0	1.148 1	0.848 1	0.798 1

系统的额定参数给定如表 2 所示。对于框架式重力储能系统来说,需要建造一个如图 4 所示的框架式系统,在实际中,需要根据系统的容量等级来选取具体建设多大的实际框架系统,并借此确定系统

表 2 系统参数

Tab. 2 System parameters

参数	数值	参数	数值
储能容量/MWh	200	装机容量/MW	100
充放电效率	0.85	折现率	0.07
充放电深度	1	系统寿命/a	30
充放电循环次数/次	600	上网电价/[元·(kWh) ⁻¹]	0.398 1
购电单价/[元·(kWh) ⁻¹]	0.323	单次购电量/MWh	235.3
年输出电量/GWh	120	置换成本/10 ⁴ 元	600
回收成本/10 ⁷ 元	2	初次投资建设成本/10 ⁸ 元	4
年购电成本/10 ⁷ 元	4.560	年度运行维护成本/10 ⁴ 元	490

图 4 Energy Vault 与中国天楹合作项目建设图^[21-22]Fig. 4 Picture of construction of a cooperation project between Energy Vault and China Tianyong^[21-22]

的初次投资建设成本。系统运营期运行维护成本是重力储能度电成本中的一个重要成分,对于重力储能项目来说,系统的运维成本可分为基于能源的维护成本、基于电力的维护成本以及人工成本。其中,基于电力的运行维护成本为重力储能系统中涉及到电力的部分,包括发电机、电动机,变压器、电力电子变换器件,以及其中使用到的电缆等的运行维护成本。基于能源的维护成本可理解为涉及到重物块上升下降用到的滑轮、钢丝绳、框架通道,以及存放重物块的平台等的运行维护成本。文章根据文献 [3, 5] 估算了系统的各类成本,如表 2 所示。

经过第一小节的理论公式计算,可得到参数如表 3 所示。

表 3 输出结果

Tab. 3 Output results

参数	数值
度电收入LROE/[元·(kWh) ⁻¹]	1.124 5
度电成本LCOE/[元·(kWh) ⁻¹]	0.906 1
系统寿命内总折现输出电量/GWh	1 489.1
平准化度电净现值LNPVE/[元·(kWh) ⁻¹]	0.218 4

由表 3 中数据可得,在系统的总收入中,要支付给成本的比例很大,减少系统的成本是增加系统收入的重要方式。

2.2 不同参数对收益的影响

通过分析不同参数对系统收益的影响可以理解系统的不确定性,为制订系统的经济性方案提供更全面的信息,确定哪些因素对系统收益有更大的影响。接下来对系统中折现率、系统寿命、上网电价等对系统 LNPVE 的影响进行分析。

在实际工程中当折现率出现变化时,系统的度电成本和度电化净现值以及其中涉及到的一些参数均会出现变化,给定当重力储能系统的折现率从 0.02 变化至 0.1 时,系统的总折现成本和总发电量的变化曲线如图 5 所示,LCOE、LROE 和 LNPVE 的变化曲线如图 6 所示。

由图 5~图 6 可得,当折现率逐渐增大时,总成本和总发电量的折现值会逐渐减小,符合第二章中的理论分析。且总折现成本的减小程度会更小,导致在图 6 中的度电成本会小幅增长一些。同时折现率的增大也会导致 LROE 和 LNPVE 逐渐增大。

重力储能系统的寿命一般较长,例如框架式重

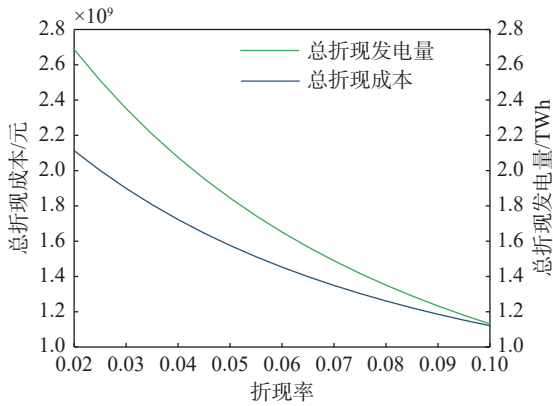


图 5 总折现成本和总折现发电量随折现率的变化曲线

Fig. 5 Curves of total discounted cost and total discounted power generation changing with the discount rate

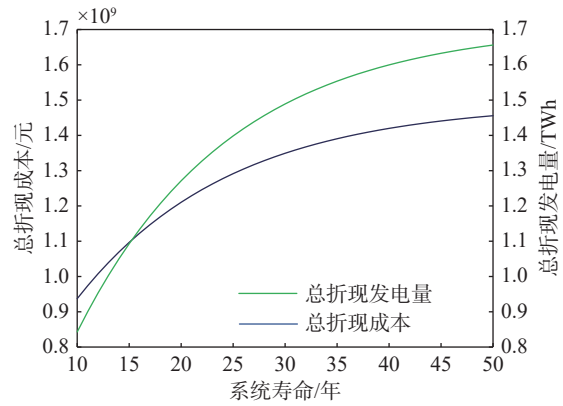


图 7 总折现成本和总折现发电量随系统寿命的变化曲线

Fig. 7 Curves of total discounted cost and total discounted power generation changing with the service life of the system

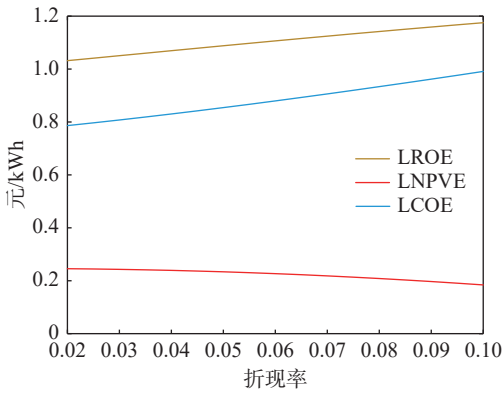


图 6 LCOE、LROE 和 LNPVE 随折现率变化的曲线

Fig. 6 Curves of LCOE, LROE and LNPVE changing with the discount rate

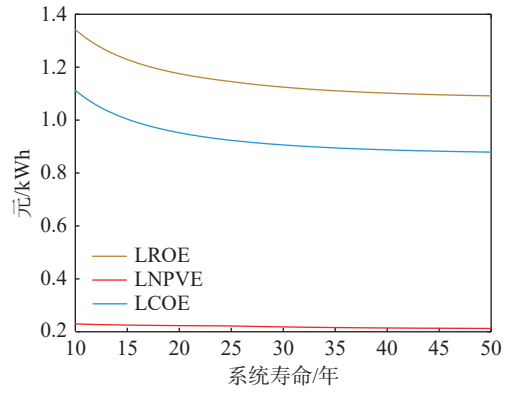


图 8 LCOE、LROE 和 LNPVE 随系统寿命的变化曲线

Fig. 8 Curves of LCOE, LROE and LNPVE changing with the service life of the system

力储能系统,使用钢筋混凝土结构组成系统,一般情况下,寿命可达 30 a,在使用了一定的防护措施后,其寿命还会延长^[23-24]。当储能系统的寿命改变时,系统的总折现成本和总发电量的变化曲线如图 7 所示,LCOE、LROE 和 LNPVE 的变化曲线如图 8 所示。

当系统寿命增加时,系统的总折现成本和总折现发电量也随之增加,但总折现发电量增加的幅度更大,因此反映在图 8 中发电成本有小幅的减小。且 LROE 也减小了,导致 LNPVE 也在减小,且减小的幅度更大。如果仅靠发电净现值来分析系统寿命变化而引起的系统收益的变化是不充分的,因此需要在此基础上再对系统的总折现成本和总净现值收入进行比较是更为合理的。总折现成本和总净现值收入随系统寿命的变化情况如图 9 所示。

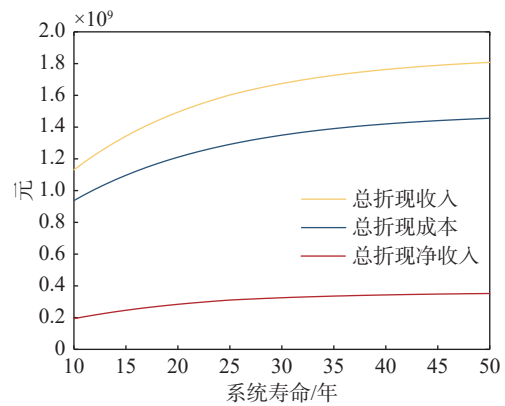


图 9 总收入与总成本随系统寿命的变化曲线

Fig. 9 Curves of total income and total cost changing with the service life of the system

图 9 中,总折现净收入为总折现收入减去总折现成本,从图中可以看出,三者均随系统寿命的增加

而增加,且随着年数增加,经过折现后增加的值越来越少。由图 7~图 9 可得,当系统寿命增加时,虽然系统的度电净现值在减小,但总的折现收入却在增加。造成这一现象的原因是,系统的总折现发电量在逐年增加,且从图 7、图 9 可以看到,系统的总折现发电量增加的幅度相较于总折现收入增加的幅度更大,最终导致了图 8 中 LROE 和 LNPVE 均在减小。

当系统的上网电价变化时,系统的 LROE 和 LNPVE 变化曲线如图 10 所示。由于上网电价不会影响系统的成本也即 LCOE,因此 LCOE 不变,所以 LROE 和 LNPVE 的变化规律相同,随着上网电价的升高而升高。

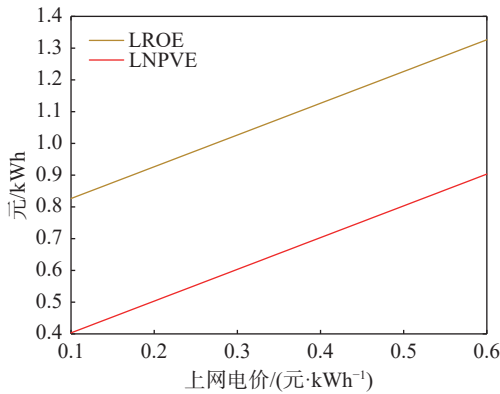


图 10 LNPVE 随上网电价的变化曲线

Fig. 10 Curve of LNPVE changing with the feed-in tariff

以上只考虑了单一因素改变时,系统经济性的变化情况,下边分析折现率和系统寿命均变化时,系统的总净现值收入变化情况。

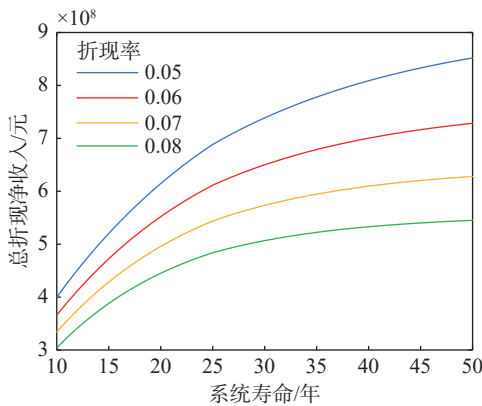


图 11 折现率固定,系统寿命变化时的总净现值收入变化

Fig. 11 Changes of the total net present value income when the discount rate is fixed and the service life of the system changes

图 11 为固定折现率,系统寿命变化时总净现值的变化情况;图 12 为固定系统寿命,折现率变化时的总净现值变化情况。由图 11 和图 12 可得,随着系统寿命增加,折现率越小系统的总净现值成本就越大,符合之前的分析。

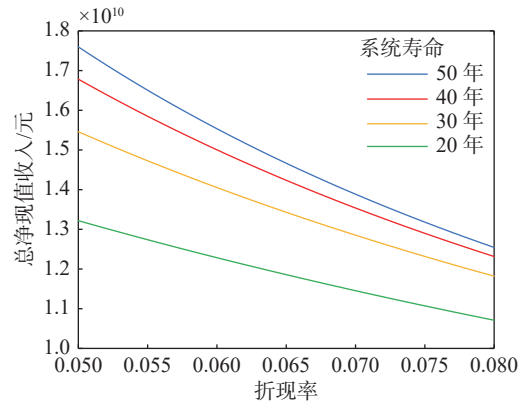


图 12 系统寿命固定,折现率变化时的总净现值收入变化

Fig. 12 Changes of the total net present value income when the service life of the system life is fixed and the discount rate changes

以上只考虑了常规工程项目的各类因素对系统经济性的影响,接下来考虑重力储能的系统效率、储能容量对系统经济性的影响。重力储能的效率较高,可达 75%~90%^[3],而其他储能形式,如与重力储能原理类似的抽水蓄能效率为 75% 左右^[25-26],化学储能的效率较高,但其寿命较短^[27-28],压缩空气储能的效率为 60% 左右^[29-30],由此可见重力储能的效率在各类储能类型中很有竞争力。由第一节理论分析所得,效率影响了系统的购电成本,进而会影响 LCOE 和 LNPVE 而 LROE 不变,其变化如图 13 所示。

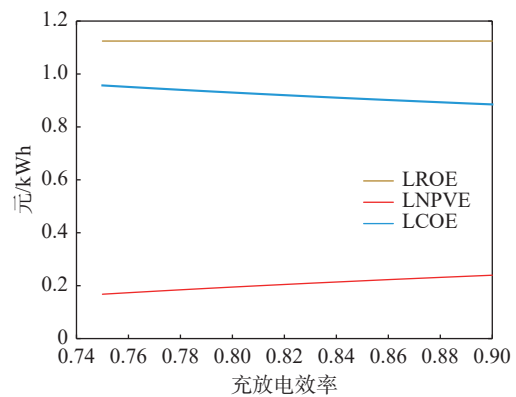


图 13 LCOE、LROE 和 LNPVE 随充放电效率的变化曲线

Fig. 13 Curves of LCOE, LROE and LNPVE changing with the charge-discharge efficiency

当系统充放电效率逐渐增大时,相当于系统损耗更小,购电的成本也就更小,所以 LCOE 逐渐减小,而 LROE 不变的原因是在第二章的理论分析中, E_t 为系统一年输出的电量,而不是产生的电量,因此不需考虑充放电效率,这样 LROE 不变,系统的 LNPVE 逐渐增大。

综上所述,折现率,系统寿命,上网电价以及度电补贴都对系统的经济性有着很大的影响,且在考虑系统经济性时,不能只看 LNPVE 的大小,例如,当系统寿命增加时,LNPVE 在逐渐减小而总的净现值收入却在增加,因此在考虑系统经济性时需要综合考虑 LCOE、LNPVE 以及总的净现值收入以及总的折现成本等。

3 结论

重力储能系统经济性是衡量一个工程能否执行的重要指标。文章主要分析框架式重力储能系统的 LNPVE 并综合考虑了系统的 LROE、LCOE、总折现成本、总净现值收入以及总折现发电量,以此分析了系统折现率、系统寿命以及上网电价变化时对系统经济性的影响情况。随着系统折现率的增大,系统 LROE、LCOE 和 LNPVE 均在增大,但 LCOE 增大的幅度相对 LROE 小,最后反映到 LNPVE 也在增大,系统的经济指标在变好。在分析系统寿命时,系统的 LNPVE 和总净现值收入呈现了相反的变化关系,总净现值收入在增加,实际上系统的经济性也应在变好,而 LNPVE 却在减小,因此仅考虑一个参数是难以对系统的经济性作出合理的判断,需要综合考虑多参数才能对系统经济性作出合理的评估。与其他储能形式相比,重力储能系统的效率较高,因此分析了系统充放电效率对系统经济性的影响。此外,下一步还需对 LCOE 各组成成本作进一步分析,以此对系统的经济性作出更准确的评估。

参考文献:

- [1] 卢静. 2024 年分布式储能系统收益将达到 165 亿美元 [J]. 中国电力, 2015, 48(9): 23.
LU J. Revenue from distributed energy storage systems will reach \$16.5 billion in 2024 [J]. *Electric power*, 2015, 48(9): 23.
- [2] 赫文豪, 李懂文, 杨东杰, 等. 新型重力储能技术研究现状与发展趋势 [J]. *大学物理实验*, 2022, 35(5): 1-7. DOI: 10.14139/j.cnki.cn22-1228.2022.05.001.
HE W H, LI D W, YANG D J, et al. Research and development of novel gravity energy storage technologies [J]. *Physical experiment of college*, 2022, 35(5): 1-7. DOI: 10.14139/j.cnki.cn22-1228.2022.05.001.
- [3] 王粟, 肖立业, 唐文冰, 等. 新型重力储能研究综述 [J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(5): 1575-1582. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0590.
WANG S, XIAO L Y, TANG W B, et al. Review of new gravity energy storage [J]. *Energy storage science and technology*, 2022, 11(5): 1575-1582. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0590.
- [4] 文军, 刘楠, 裴杰, 等. 储能技术全生命周期度电成本分析 [J]. *热力发电*, 2021, 50(8): 24-29. DOI: 10.19666/j.rlfid.202105094.
WEN J, LIU N, PEI J, et al. Life cycle cost analysis for energy storage technology [J]. *Thermal power generation*, 2021, 50(8): 24-29. DOI: 10.19666/j.rlfid.202105094.
- [5] 刘晓辉, 袁康, 白亚奎, 等. 框架式重力储能系统经济性分析 [J]. *分布式能源*, 2023, 8(3): 47-53. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2308307.
LIU X H, YUAN K, BAI Y K, et al. Economic analysis of frame gravity energy storage system [J]. *Distributed energy*, 2023, 8(3): 47-53. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2308307.
- [6] MUGYEMA M, BOTHA C D, KAMPER M J, et al. Levelised cost of storage comparison of energy storage systems for use in primary response application [J]. *Journal of energy storage*, 2023, 59: 106573. DOI: 10.1016/j.est.2022.106573.
- [7] MOAZZAMI M, MORADI J, SHAHINZADEH H, et al. Optimal economic operation of microgrids integrating wind farms and advanced rail energy storage system [J]. *International journal of renewable energy research*, 2018, 8(2): 1155-1164. DOI: 10.20508/ijrer.v8i2.7056.g7401.
- [8] BERRADA A, EMRANI A, AMEUR A. Life-cycle assessment of gravity energy storage systems for large-scale application [J]. *Journal of energy storage*, 2021, 40: 102825. DOI: 10.1016/j.est.2021.102825.
- [9] 何颖源, 陈永翀, 刘勇, 等. 储能的度电成本和里程成本分析 [J]. *电工电能新技术*, 2019, 38(9): 1-10. DOI: 10.12067/ATEEE1907045.
HE Y Y, CHEN Y C, LIU Y, et al. Analysis of cost per kilowatt-hour and cost per mileage for energy storage technologies [J]. *Advanced technology of electrical engineering and energy*, 2019, 38(9): 1-10. DOI: 10.12067/ATEEE1907045.
- [10] 祝青, 沈晨姝, 李木子, 等. 大型集中式风电储能系统的配置及收益模式研究 [J]. *电工技术*, 2022(17): 4-8. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2022.17.002.
ZHU Q, SHEN C S, LI M Z, et al. Research on configuration and revenue model of large centralized wind energy storage system [J]. *Electric engineering*, 2022(17): 4-8. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2022.17.002.
- [11] 凌万水, 刘刚, 侯勇. 工业用户配置储能系统的经济收益分析 [J]. *供用电*, 2019, 36(8): 54-60. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2019.08.009.

- LING W S, LIU G, HOU Y. Economic income analysis of industrial user's configuring energy storage system [J]. *Distribution & utilization*, 2019, 36(8): 54-60. DOI: [10.19421/j.cnki.1006-6357.2019.08.009](https://doi.org/10.19421/j.cnki.1006-6357.2019.08.009).
- [12] 易检长, 任中俊, 谢玉军. 不同结算电价对光伏发电项目经济性影响分析 [J]. *建设科技*, 2022(10): 86-89. DOI: [10.16116/j.cnki.jskj.2022.10.019](https://doi.org/10.16116/j.cnki.jskj.2022.10.019).
- YI J C, REN Z J, XIE Y J. Analysis on economic impact on PV power generation projects under different pricing mechanisms [J]. *Construction science and technology*, 2022(10): 86-89. DOI: [10.16116/j.cnki.jskj.2022.10.019](https://doi.org/10.16116/j.cnki.jskj.2022.10.019).
- [13] 张丽娜, 王金梅, 杨国华, 等. 计及电网电价的微网能量优化管理 [J]. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(4): 379-383. DOI: [10.3969/j.issn.0253-2328.2020.04.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-2328.2020.04.014).
- ZHANG L N, WANG J M, YANG G H, et al. Micro-grid energy optimization management based on grid electricity price [J]. *Journal of Ningxia University (natural science edition)*, 2020, 41(4): 379-383. DOI: [10.3969/j.issn.0253-2328.2020.04.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-2328.2020.04.014).
- [14] 徐伟, 刘振领, 王华智, 等. 基于 LCOE 模型的农村光伏系统社会效益评价——以北京郊区屋顶分布式光伏项目为例 [J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(9): 208-217. DOI: [10.11841/j.issn.1007-4333.2023.09.19](https://doi.org/10.11841/j.issn.1007-4333.2023.09.19).
- XU W, LIU Z L, WANG H Z, et al. Evaluation of socio-economic benefits of rural PV systems based on LCOE model: an example of rooftop distributed PV projects in Beijing suburbs [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(9): 208-217. DOI: [10.11841/j.issn.1007-4333.2023.09.19](https://doi.org/10.11841/j.issn.1007-4333.2023.09.19).
- [15] 白映波, 王兴鹏, 李欣达, 等. 超高海拔地区集中式光伏发电项目的经济与环境效益分析 [J]. *太阳能*, 2023(10): 21-29. DOI: [10.19911/j.1003-0417.tyn20230223.01](https://doi.org/10.19911/j.1003-0417.tyn20230223.01).
- BAI Y B, WANG X P, LI X D, et al. Economic and environmental benefits analysis of centralized PV power generation projects in ultra-high altitude areas [J]. *Solar energy*, 2023(10): 21-29. DOI: [10.19911/j.1003-0417.tyn20230223.01](https://doi.org/10.19911/j.1003-0417.tyn20230223.01).
- [16] 昌敦虎, 田川, 张泽阳, 等. 基于 LCOE 模型的光伏发电经济效益分析: 以宜昌农村地区光伏扶贫电站项目为例 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(10): 2412-2420. DOI: [10.13198/j.issn.1001-6929.2020.08.24](https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2020.08.24).
- CHANG D H, TIAN C, ZHANG Z Y, et al. Economic benefit analysis on photovoltaic power generation with LCOE model: the case of poverty alleviation project in rural areas of Yichang city [J]. *Research of environmental sciences*, 2020, 33(10): 2412-2420. DOI: [10.13198/j.issn.1001-6929.2020.08.24](https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2020.08.24).
- [17] 张宇翔, 何海艳, 黄骏飞, 等. 基于平准化度电净现值模型的轨道交通光伏发电储能一体化项目的经济效益分析 [J]. *城市轨道交通研究*, 2023, 26(10): 103-108,115. DOI: [10.16037/j.1007-869x.2023.10.018](https://doi.org/10.16037/j.1007-869x.2023.10.018).
- ZHANG Y X, HE H Y, HUANG J F, et al. Economic benefit analysis of rail transit photovoltaic power generation and energy storage integration project based on levelized net present value model [J]. *Urban mass transit*, 2023, 26(10): 103-108,115. DOI: [10.16037/j.1007-869x.2023.10.018](https://doi.org/10.16037/j.1007-869x.2023.10.018).
- [18] WANG H C, WANG X M, FU Z M. Energy management strategy for optimal charge depletion of plug-in FCHEV based on multi-constraints deep reinforcement learning [J/OL]. *IEEE transactions on transportation electrification*, 2024:1-1(2024-05-13) [2024-06-28]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10529282>. DOI: [10.1109/TTE.2024.3400020](https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3400020).
- [19] 蔡舒平, 葛佳伟, 程之瑞. 基于增强型遗传算法和 NPV 的微网优化 [J]. *信息技术*, 2017(2): 150-154,160. DOI: [10.13274/j.cnki.hdzt.2017.02.036](https://doi.org/10.13274/j.cnki.hdzt.2017.02.036).
- CAI S P, GE J W, CHENG Z R. Research on economical optimal operation based on improved adaptive genetic algorithm optimization with NPV [J]. *Information technology*, 2017(2): 150-154,160. DOI: [10.13274/j.cnki.hdzt.2017.02.036](https://doi.org/10.13274/j.cnki.hdzt.2017.02.036).
- [20] 何一丹, 何正文, 王能民, 等. 共享经济环境下的资源约束 Max-NPV 多项目调度优化 [J/OL]. *中国管理科学*, 2024:1-13(2022-10-28) [2024-06-28]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.2332>.
- HE Y D, HE Z W, WANG N M, et al. Resource-constrained Max-NPV multi-project scheduling optimization under sharing economy environment [J/OL]. *Chinese journal of management science*, 2022:1-13(2022-10-28) [2024-06-28]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.2332>.
- [21] 王柄根. 中国天楹: 推进首个重力储能项目建设 [J]. *股市动态分析*, 2023, (16):35.
- WANG B G. China Tianying: promoting the construction of the first gravity energy storage project [J]. *Stock market trend analysis weekly*, 2023, (15):35.
- [22] 王柄根. 中国天楹: 重力储能示范项目充放电测试成功 [J]. *股市动态分析*, 2024(9): 35. DOI: [10.3969/j.issn.1671-0401.2024.09.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-0401.2024.09.017).
- WANG B G. China Tianying: successful charge-discharge test of gravity energy storage demonstration project [J]. *Stock market trend analysis weekly*, 2024(9): 35. DOI: [10.3969/j.issn.1671-0401.2024.09.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-0401.2024.09.017).
- [23] 王文军. 延长钢筋混凝土结构寿命的几点思考 [J]. *海河水利*, 2008(6): 42-43. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7328.2008.06.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7328.2008.06.017).
- WANG W J. Thoughts on extending the life of reinforced concrete structure [J]. *Haihe water resources*, 2008(6): 42-43. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7328.2008.06.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7328.2008.06.017).
- [24] 王晨, 杜小平, 许麦扎, 等. 混凝土梁耐久性防护涂层基本性能试验 [J]. *涂层与防护*, 2024, 45(5): 1-8,14. DOI: [10.3969/j.issn.2096-8639.2024.05.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-8639.2024.05.001).
- WANG C, DU X P, XU M Z, et al. Basic performance test of durable protective coatings for concrete beams [J]. *Coating and protection*, 2024, 45(5): 1-8,14. DOI: [10.3969/j.issn.2096-8639.2024.05.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-8639.2024.05.001).
- [25] 谢琛. 十三陵抽水蓄能电站综合循环效率分析 [J]. *水力发电*, 2002, 28(9): 7-8,13. DOI: [10.3969/j.issn.0559-9342.2002.09.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.0559-9342.2002.09.004).

- XIE C. Analysis on the comprehensive circulation efficiency of Shisanling pumped-storage power plant [J]. *Water power*, 2002, 28(9): 7-8,13. DOI: [10.3969/j.issn.0559-9342.2002.09.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.0559-9342.2002.09.004).
- [26] 郑彦春, 陕超伦, 张晋宾. 长持续时间储能体系研究现状及发展展望 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(2): 93-101. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.2.09](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.2.09).
- ZHENG Y C, SHAN C L, ZHANG J B. Current research status and development prospects of long duration energy storage system [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(2): 93-101. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.2.09](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.2.09).
- [27] 贺鸿杰, 张宁, 杜尔顺, 等. 电网侧大规模电化学储能运行效率及寿命衰减建模方法综述 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(12): 193-207. DOI: [10.7500/AEPS20190820005](https://doi.org/10.7500/AEPS20190820005).
- HE H J, ZHANG N, DU E S, et al. Review on modeling method for operation efficiency and lifespan decay of large-scale electrochemical energy storage on power grid side [J]. *Automation of electric power systems*, 2020, 44(12): 193-207. DOI: [10.7500/AEPS20190820005](https://doi.org/10.7500/AEPS20190820005).
- [28] 李学斌, 赵号, 陈世龙. 预制舱式磷酸铁锂电池储能电站能耗计算研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(2): 71-77. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.010](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.010).
- LI X B, ZHAO H, CHEN S L. Research on energy consumption calculation of prefabricated cabin type lithium iron phosphate battery energy storage power station [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(2): 71-77. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.010](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.010).
- [29] 张磊. 压缩空气储能系统效率分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2013. DOI: [10.7666/d.Y2428965](https://doi.org/10.7666/d.Y2428965).
- ZHANG L. Efficiency analysis of compressed air energy storage system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. DOI: [10.7666/d.Y2428965](https://doi.org/10.7666/d.Y2428965).
- [30] 万明忠, 杨易凡, 袁照威, 等. 大容量压缩空气储能关键技术 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(6): 26-33. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.003).
- WAN M Z, YANG Y F, YUAN Z W, et al. Key technologies of large-scale compressed air energy storage [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(6): 26-33. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.003).

作者简介:



徐志强

徐志强(通信作者)

1977-, 男, 正高级工程师, 电力系统及其自动化, 博士, 长期从事储能技术研究工作(email)zqxu@ceec.net.cn。

(编辑 徐嘉铖)