

计及电池寿命的储能参与调频市场收益分析

章枫^{1,2}, 房乐^{1,2}, 陆承宇^{1,2}, 邓晖^{1,2}, 周子青^{1,2}, 马骏超¹

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014;

2. 国网浙江省电力有限公司电力市场仿真实验室, 杭州 310014)

摘要: 储能作为重要的高弹性资源, 能够为电网运行提供调峰、调频等辅助服务。针对电力市场环境 下储能参与调频市场机制与考虑储能寿命的收益模型开展研究。基于基本市场框架建立了储能参与 调频市场收益模型, 分析储能充放电速率、充放电深度和储能荷电状态对储能电池寿命衰减的影响, 通过类雨流计数法考虑了储能循环寿命对调频收益的影响。根据浙江电力市场典型方式仿真数据, 对 不同储能电站规模、储能放电容量及电池 100%充放电深度循环寿命次数下的储能参与调频市场全寿 命周期收益进行仿真分析, 为相关研究提供参考。

关键词: 储能; 电池衰减; 电池寿命; 调频市场; 放电容量

文章编号: 1007-1881(2021)12-0061-08

DOI: 10.19585/j.zjdl.202112008

中图分类号: F426.61

文献标志码: B

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Market Returns Analysis of Energy Storage Participating in Frequency Regulation Considering Battery Life

ZHANG Feng^{1,2}, FANG Le^{1,2}, LU Chengyu^{1,2}, DENG Hui^{1,2}, ZHOU Ziqing^{1,2}, MA Junchao¹

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Hangzhou 310014, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Power Market Simulation Laboratory, Hangzhou 310014, China)

Abstract: As an important highly flexible resource, battery storage can provide auxiliary services such as peak regulation and frequency regulation for power system operation. This paper launches research of market mechanism for energy storage participating in frequency regulation and return model considering energy storage lifespan in the context of electricity market. First, a return model is built based on the basic power market framework; then the influence of charge and discharge rate of energy storage, depths of charge and discharge and energy storage SoC on battery life attenuation is analyzed, and the influence of energy storage cycle life on returns of frequency regulation is analyzed through the rain flow counting method. Finally, the returns for grid-scale battery storage in regulation market during the battery life is estimated in different energy storage station scales, energy storage discharge capacities and 100 percent depth of discharge battery life based on the simulation operation data of the Zhejiang power market.

Keywords: energy storage; battery degradation; battery life; frequency regulation market; discharge capacity

0 引言

储能可以在电力系统中发挥平抑可再生能源波动、削峰填谷、提高供电可靠性、调峰和调频等重要作用^[1-2], 作为重要高弹性资源, 能够为电网运行提供调峰、调频、备用、黑启动、需求响应支撑等多种服务, 是提升传统电力系统灵活

性、经济性和安全性的主要手段之一。随着“过亿电网”时代的来临及电力现货市场试点工作的推进, 浙江电网面临着安全可靠、清洁低碳、经济高效考验, 需借鉴美国成熟电力市场的经验^[3-4], 加大储能发展力度, 促进浙江省储能技术和产业发展, 助力清洁能源示范省的建设。然而, 储能定价权限在国家层面, 目前尚无充放电价、补偿电价等配套电价机制。同时, 现有成本监审办法和定价办法明确规定储能设施不得纳入有效资产, 相关成本费用不得纳入准许成本。电网侧储

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(B311DS21000A)

能缺乏相应的成本疏导途径。因此,探究储能通过市场化手段回收成本并获得合理收益是保障电化学储能行业高质量、可持续发展的重点。2017年,国家发改委等五部委联合印发《关于促进储能技术与产业发展的指导意见(发改能源)[2017]1701号》,要求建立健全储能参与的市场机制,允许储能系统与机组联合或作为独立主体参与辅助服务交易^[5]。近年来,江苏、江西、山东等省份相继发文鼓励储能参与市场化交易。

2015年,中共中央国务院发布了《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》(中发[2015]9号),按照“管住中间、放开两头”的体制架构,有序推进电价改革、电力交易体制改革、发用电计划改革等。2017年6月,随着浙江省政府经济体制改革工作领导小组会议的顺利召开,浙江电力体制改革综合试点工作正式启动。截至目前,浙江电力现货市场顺利完成4次结算试运行工作,市场参与主体包括全省统调发电厂,省统调风电、光伏发电机组暂参与模拟报价,不参与出清和调电,外来电、电化学储能和用户侧暂不参与。

储能系统参与电力现货市场主要通过2种方式获利:一是参与电能量市场,凭借充放电价差获利;二是参与调频辅助服务市场,获得调频调用从而获利^[6-8]。但储能系统运行具有较强的时间耦合性,且运行成本变化复杂,市场机制的差异会对储能的运行特性和收益产生较大影响。目前浙江电力现货市场仍处于建设初期,尚未建立针对独立储能参与的相关机制。有关储能申报信息、调用及结算方式尚不明确,且目前浙江电力现货市场峰谷价差不大,储能参与电能量市场难以回收成本,因此开展储能参与浙江调频市场机制研究,具有极强的现实意义和理论价值。

1 电力市场基本框架

本文采用具有普遍意义的电力市场基本框架,以研究储能在调频市场中的全生命周期收益情况。

假设储能电站作为单一调频辅助服务单元以调频申报模式参与调频市场,调频申报包括调频容量申报、调频容量价格申报和调频里程价格申报。储能参与调频市场的机制为:综合考虑调频市场需求、调频服务供应商的数据、综合调频性能指标等,根据调频报价机组申报的容量报价、

调频容量以及里程报价,技术支持系统根据每台机组的历史调频性能归一化指标对报价进行调整,得到调整后的调频里程成本、调频容量成本和机会成本;将调整容量报价,调整机会成本和(调整里程报价×里程容量比)加总计算得到的调频组合排序价格由低到高进行排序;按调频排序价格从低到高依次出清,直至中标的AGC(自动增益控制)单元容量总和满足电力调度机构发布的调频需求;当AGC单元的排序价格相同时,优先出清容量高的AGC单元;最后一个中标的AGC单元调频排序价格为调频市场的统一出清价格;将中标机组的调整里程报价进行排序,得到调频里程出清价格。

调频容量出清价格=调频出清价格-调频里程出清价格×里程容量比。

中标储能电站在调频市场上提供调频服务可以获得相应的调频容量和调频里程费用。调频容量、调频里程费用按日统计、按月进行结算。其月度调频容量费用 S_{bc} 和调频里程费用的计算公式分别为:

$$S_{bc} = \sum_{i=1}^n (K_{b,i} \cdot Q_{bc,i} \cdot \pi_{bc,i}) \quad , \quad (1)$$

$$S_{bm} = \sum_{i=1}^n (K_{b,i} \cdot Q_{bm,i} \cdot \pi_{bm,i}) \quad , \quad (2)$$

式中: n 为每月现货市场总的交易周期数; $Q_{bc,i}$ 为该机组在第 i 个交易周期的中标调频容量; $Q_{bm,i}$ 为该机组在第 i 个交易周期的实际调频里程,由AGC数据接入给出; $\pi_{bc,i}$ 为第 i 个交易周期的调频容量结算价格; $\pi_{bm,i}$ 为第 i 个交易周期的调频里程结算价格; $K_{b,i}$ 为发电单元在第 i 个交易周期的历史调频性能归一化指标平均值。

调频市场出清具体流程如图1所示,具体示例如下。

1.1 调频市场报价及调整

系统中有4台机组参与调频市场,市场主体需在调频市场中进行容量报价、调频容量和调频里程申报,如表1所示。其中:调整容量报价=容量报价/调频性能指标,调整里程报价=里程报价/调频性能指标。

1.2 调频出清

将表2的调整容量报价、调整机会成本和(调整里程报价×里程容量比)加总计算得到调频组

合排序价格,并由低到高排序,如表 2 所示。假设系统调频需求为 25 MW,则边际调频机组为 D。

表 2 调频市场出清

机组	调频性能指标	调频容量 /MW	调频排序价格 /((元·MWh ⁻¹))	中标容量 /MW
B	0.96	5	10.52	5
C	1	10	15.40	10
D	0.8	15	32.75	10
A	0.14	8	86.43	0

1.3 调频定价

假设系统出清的中标机组实际机会成本未发生变化,可以得到调频定价排序价格如表 3 所示。

表 3 调频市场定价

机组	调频性能指标	调频容量 /MW	调频排序价格 /((元·MWh ⁻¹))	中标容量 /MW
B	0.96	5	10.52	5
C	1	10	15.40	10
D	0.8	15	32.75	10

由表 3 调频定价价格排序可知,调频出清价格为 32.75 元/MWh,边际机组为 D。对中标机组的调频里程报价进行排序,结果如表 4 所示。

由表 4 调频里程价格排序可知,调频里程出清价格为 1.813 元/MW,边际机组为 D。可以计算得到调频容量出清价格为 14.62 元/MWh。

表 4 调频里程定价

机组	调频性能指标	调频容量 /MW	调频里程报价 /((元·MW ⁻¹))	中标容量 /MW
C	1	10	0.850	10
B	0.96	5	0.885	5
D	0.8	15	1.813	10

1.4 调频结算

假设 D 机组一小时内的调频里程为 100 MW,实际调频性能归一化指标为 0.85,则其 1 h 调频容量费用为 1 h×调频容量出清价格×出清容量×实际调频性能归一化指标=14.62×10×0.85=124.27 元,调频里程费用为调频里程出清价格×实际里程×实际调频性能归一化指标=1.813×100×0.85=154.11 元,合计费用 278.38 元。

2 储能电池模型

在分析与评估储能参与调频市场收益时,不能不考虑电化学储能的运行效率和寿命衰减的影响。国内外研究发现,电化学储能充放电速率、DOD(充放电深度)和储能荷电状态等均会对储能的运行效率及寿命衰减产生非线性影响^[9]。

2.1 电池衰减

通常将电池充放电过程的老化和闲置过程的老化分别称为循环老化和日历老化^[10]。一般认为,当锂离子电池的能量容量下降为额定能量容

表 1 调频市场成本调整

机组	调频性能指标	容量报价 /((元·MWh ⁻¹))	调频容量 /MW	调整容量报价 /((元·MWh ⁻¹))	里程报价 /((元·MW ⁻¹))	调整里程报价 /((元·MW ⁻¹))	里程容量比 /((1·h ⁻¹))	调整里程报价×里程容量比 /((元·MWh ⁻¹))	调整机会成本 /((元·MWh ⁻¹))
A	0.14	2.6	8	18.57	0.95	6.786	10	67.86	0
B	0.96	1.6	5	1.67	0.85	0.885	10	8.85	0
C	1	2.9	10	2.90	0.85	0.850	10	8.50	4
D	0.8	3.7	15	4.63	1.45	1.813	10	18.13	10

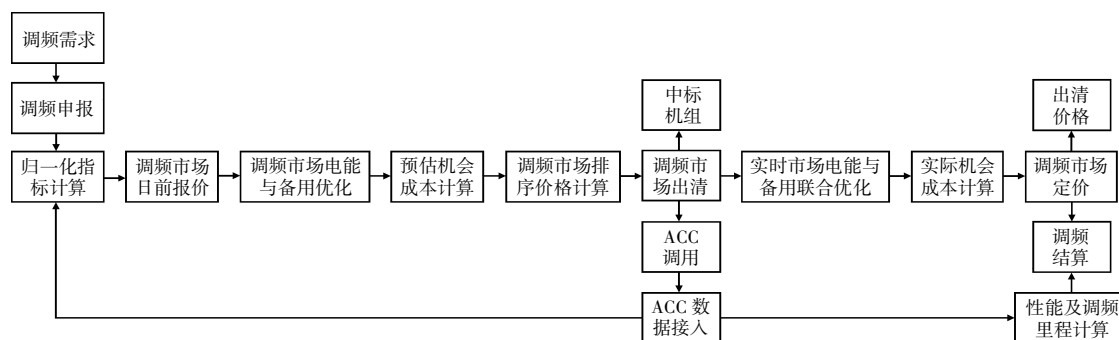


图 1 调频市场运行流程

量的80%时,锂离子电池将无法正常使用,处于完全老化阶段^[11]。不考虑环境温度对电池寿命的影响,假设在100%DOD情况下,电池的循环寿命为 $T_{\text{cycle}}=N_{100}$,由文献[8]可知,在 d DOD下电池的循环寿命可表示为:

$$f(d)=N_{100}d^{-k_p}, \quad (3)$$

式中: k_p 为定值,对不同电池而言其取值范围一般在0.8~2.1^[8]; d 为电池充放电深度。DOD对电池循环寿命的影响较大,且电池循环寿命与DOD呈非线性关系。如文献[12]所述,法国电池制造商FORSEE POWER的HE 48 V锂电池的 k_p 值约为1.1。则若电池在 d DOD下电池循环 n_d 次,其等效100%DOD电池循环次数可以表示为:

$$n_{100}^{\text{eq}}=n_d d^{k_p}, \quad (4)$$

式中: n_{100}^{eq} 为等效100%DOD电池循环次数。

2.2 电池循环寿命的类雨流计数法

对于电池充放电的充电或放电半周期而言,若 E_k^m 为第 k 个半周期结束时电池的能量水平,则其DOD可以表示为:

$$\text{dod}_k^{\text{half}}=\left|\frac{E_k^m-E_{k-1}^m}{E_{\text{max}}}\right|, \quad (5)$$

式中: $\text{dod}_k^{\text{half}}$ 为半周期电池充放电深度; E_k^m 为第 $k-1$ 个半周期结束时电池的能量水平; E_{max} 为电池最大能量水平。

若以一天为计算单位,其等效100%DOD循环次数为:

$$n_{100}^{\text{eq,day}}=\sum_{k \in \text{day}} 0.5 \cdot (\text{dod}_k^{\text{half}})^{k_p}, \quad (6)$$

式中: $n_{100}^{\text{eq,day}}$ 为一天等效100%DOD电池循环次数。

同理可知,若储能参与调频市场,其荷电量变化为^[7]:

$$\begin{cases} \text{dod}_k^{\text{up}}=\frac{\Delta E_n+\Delta E_R}{E_{\text{max}}} \\ \Delta E_n=\Delta E_i(t_k^{\text{max}}-t_k^{\text{min}})/h \\ \Delta E_R=\text{Cap}_i^{\text{reg}}(\text{Reg}D_k^{\text{max}}-\text{Reg}D_k^{\text{min}}) \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} \text{dod}_k^{\text{down}}=\frac{\Delta E_n+\Delta E_R}{E_{\text{max}}} \\ \Delta E_n=-\Delta E_i(t_k^{\text{max}}-t_k^{\text{min}})/h \\ \Delta E_R=\text{Cap}_i^{\text{reg}}(\text{Reg}D_k^{\text{max}}-\text{Reg}D_{k+1}^{\text{min}}) \end{cases}, \quad (8)$$

式中: dod_k^{up} 为 k^{th} 时段上调频DOD; $\text{dod}_k^{\text{down}}$ 为 k^{th}

时段下调频DOD; ΔE_i 为某调频结算间隔 t 时段内的储能电能变化情况; h 为调频结算间隔时间; t_k^{max} 和 t_k^{min} 分别为 $\text{Reg}D_k^{\text{max}}$ 和 $\text{Reg}D_k^{\text{min}}$ 所在时刻; $\text{Cap}_i^{\text{reg}}$ 为 t 时段储能的调频中标容量; $\text{Reg}D_k^{\text{max}}$ 和 $\text{Reg}D_k^{\text{min}}$ 分别为 k^{th} 时段的最大和最小调频信号。

根据式(6)可知,每天电池的等效100%DOD循环次数为:

$$n_{100}^{\text{eq,day}}=\sum_{k \in \text{day}} 0.5 \cdot [(\text{dod}_k^{\text{up}})^{k_p}+(\text{dod}_k^{\text{down}})^{k_p}]. \quad (9)$$

因此可按如下方式计算储能参与调频市场的电池循环寿命:按调频指令下发时间间隔 h 将每天的调频市场分隔成 N 段,其中 $i \in \{1, \dots, N\}$;将电池的日历寿命 L_{cal} 按每天分隔成 L_{cal} 段,其中 $\tau \in \{1, \dots, L_{\text{cal}}\}$ 。则 i^{th} 时段电池充电的电能为 $x_i^{\tau}=\eta_{\text{ch}} h \delta_i^{\tau}$,其中 η_{ch} 为充电效率, δ_i^{τ} 为电池的充电功率, $\delta_i^{\tau} \in [\delta_{\text{min}}, \delta_{\text{max}}]$, $\delta_{\text{max}} \geq \delta_{\text{min}} \geq 0$; i^{th} 时段电池放电的电能为 $x_i^{\tau}=h \delta_i^{\tau} / \eta_{\text{dis}}$,其中 η_{dis} 为放电效率, δ_i^{τ} 为电池放电功率, $\delta_i^{\tau} \in [\delta_{\text{min}}, \delta_{\text{max}}]$, $\delta_{\text{max}} \leq \delta_{\text{min}} \leq 0$;当 $\delta_i^{\tau} > 0$ 时表示充电, $\delta_i^{\tau} < 0$ 时表示放电。令 b_i^{τ} 表示 i^{th} 时段电池荷电情况,则 $b_i^{\tau}=b_{i-1}^{\tau}+x_i^{\tau}$ 。假设电池初始容量为 B_{rated} ,假设电池容量衰减与日期及电池循环次数近似呈线性关系,一般锂电池容量小于80%时,默认其报废,则在 τ 天的电池容量为:

$$B_a(\tau)=B_{\text{rated}}-0.2 \times \left[\max\left(\frac{O_{\text{cy}}(\tau)}{L_{\text{cy}}}, \frac{\tau}{L_{\text{cal}}}\right) \right], \quad (10)$$

式中: $O_{\text{cy}}(\tau)$ 为截止到 τ 天的电池100%DOD循环次数; L_{cy} 为电池循环寿命次数。则 τ 天 i^{th} 的SOC为 $\text{SOC}_i^{\tau}=b_i^{\tau} / B_a(\tau)$ 。

$$O_{\text{cy}}(\tau)=\sum_{j=1}^{\tau} (n_{100}^j), \quad (11)$$

式中: n_{100}^j 为第 j 天的100%DOD等效电池循环次数。

储能电站参与调频市场的电池寿命计算流程如图2所示。具体流程如下:

步骤1:初始化各项计算参数,令 L_{cy} 等于电池的100%DOD循环寿命次数, L_{cal} 为电池的日历寿命天数, B_{rated} 为电池的初始额定容量。

步骤2:初始化天数及 $O_{\text{cy}}(\tau)$ 值,令初始的电池100%DOD循环次数为0。

步骤3:根据式(10)计算剩余电池容量 $B_a(\tau)$ 。

步骤4:若剩余电池容量大于等于80%,则根据式(7)~(9)计算 $\tau+1$ 天的电池等效100%DOD循环次数 n_{100}^{eq} ,其中 τ 天的 $E_{\text{max}}(\tau)$ 为 $B_a(\tau)$ 。截止到

τ 天的电池100%DOD循环次数 $O_{cy}(\tau)=O_{cy}(\tau-1)+n_{100}^{eq}(\tau)$ 。若剩余电池容量小于80%,流程结束。

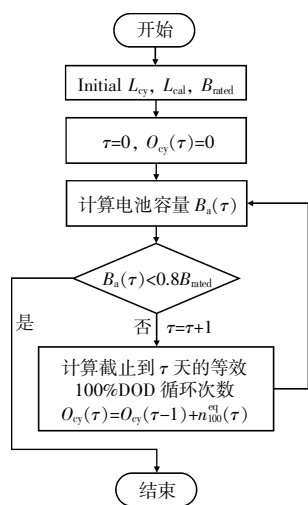


图2 电池寿命计算流程

3 算例分析

浙江电网侧储能起步较晚,总体尚未形成规模,发展相对缓慢。目前,共规划建设2批电网侧储能电站,第一批电网侧储能共4座,规模合计22.03 MW/69.65 MWh,动态投资总额约为1.712亿元,项目具体情况如表5所示。

表5 浙江省已投运或在建电网侧储能项目概况

项目名称	建设规模	可研投资/万元	电池技术	投运状态
杭州江虹变储能	4 MW/12.8 MWh	4 669	磷酸铁锂	在建
宁波越瓷变储能	6 MW/8.4 MWh	4 049	磷酸铁锂	投运
湖州金陵变储能	6 MW/24 MWh	4 903/3 259 (一/二期)	铅酸	投运
衢州大麦源村储能	30 kW/450 kWh	240	铅碳	投运

3.1 仿真参数

设置一个容量为24 MWh,额定充放电功率为9 MW的磷酸铁锂电池储能电站,参考PJM电力市场某日的储能电站AGC调频指令及荷电量变化情况数据,并按照储能参与浙江电力市场方案与模拟报价策略^[13],基于浙江电力市场某月典型方式的调频里程和容量价格仿真数据进行复盘分析。

浙江某储能电站实测参数及收益仿真基础参数如表6和表7所示。

表6 某储能电站实测参数

电站名称	磷酸铁锂储能电站
额定容量/MWh	24
额定充电功率/MW	9
额定放电功率/MW	9
充放电效率 η	0.9
N_{cyc} /次	5 000
电池组寿命期间衰减后余量/%	80
固定成本/万元	7 926
年运营成本/(元·Wh ⁻¹)	0.05

表7 某储能电站收益仿真基础参数

名称	数值	%
销项税率	13	
附加税(城市维护建设税和教育费附加)	12	
所得税税率	25	
折现率	4.27	
电池折旧率	0	

3.2 全周期寿命仿真

参考PJM电力市场某日的储能电站AGC调频指令及荷电量变化数据,根据储能电池循环寿命类雨滴计数法模型可得在保持储能电站额定容量不变的情况下,不同额定充放电功率时储能电站参与调频市场的循环老化寿命,结果如图3所示。后续仿真全周期寿命时取日历寿命与循环老化寿命的低值。

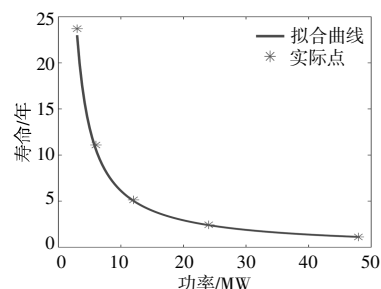


图3 不同功率下的储能电站循环老化寿命

3.3 仿真结果分析

储能参与调频市场时,由于其调节性能好,对AGC指令响应较快,因此将历史调频性能归一化指标平均值设为1。储能的调频容量和调频里程价格参考浙江电力市场典型方式仿真数据。

影响电化学储能市场化收益主要有放电容量、电池类型、电池充放电循环次数、储能电站规模等关键性能指标。本文主要通过测算放电容量、电池充放电循环次数、储能电站规模3个关键性能指标对储能电站市场化收益的影响,为储能电站参与浙江电力市场策略、提高市场化收益提供相关参考意见与建议。

1)算例1:储能按标准参数参与调频市场收益。

储能按标准参数参与浙江调频市场,根据浙江某月实际模拟试运行分时段调频里程数据估算,可得储能电站参与浙江调频市场月调频里程为80352 MW,由浙江电力市场某月典型方式的调频里程和容量价格仿真数据可知,每30 min出清时段的平均调频容量价格为116.3元/MW,平均调频里程价格为12.44元/MW。因此,由式(1)和式(2)计算可得储能参与某月浙江调频市场预计收益为177.8万元,以此作为储能电站月度经营性收益,预计年度收益为2134.1万元。同时由图3分析可得标准参数下储能电站的全寿命周期为6.85年,依据表7计算可得全寿命周期储能电站的总净现值收入为7985.89万元,投资回报率预计为0.76%,折现后基本能回收投资成本。

2)算例2:不同放电容量下储能参与调频市场收益。

保持储能电站的额定容量不变,分析不同额定功率下储能电站参与调频市场的收益情况时,成本差异主要体现在变流器购买成本上。通过模拟改变储能电站的额定功率仿真,可得到不同额定功率下储能电站参与调频市场的收益结果,如图4所示。

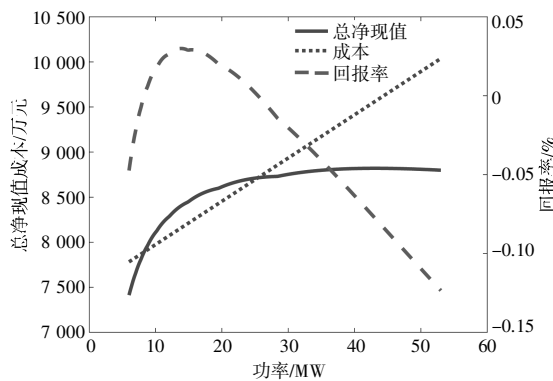


图4 不同放电容量下的储能电站收益

从图4可以看出,储能电站参与调频市场投资回报与收益率随着额定功率的增加先增后减,其最大收益在储能电站额定功率为13.8 MW左右达到,此时固定成本为8156.4万元,全寿命周期总净现值为8400.7万元,投资回报率为2.995%。

3)算例3:不同电站规模下储能参与调频市场收益。

保持储能电站的放电容量不变,分析不同储能电站规模下储能电站参与调频市场的收益情况时,成本差异主要体现在变流器和电池的购买成本、人工运营维护成本上。通过模拟改变储能电站的规模,可得到不同储能电站规模下储能参与调频市场的收益结果,如图5所示。

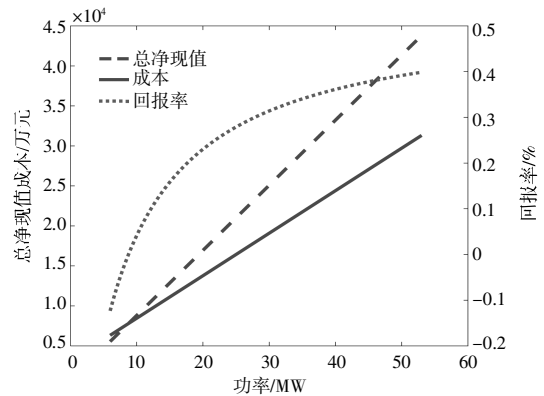


图5 不同电站规模下的储能电站收益

从图5可以看出,储能电站参与调频市场投资回报与收益率随着储能电站规模的增大而增大,当电池类型为磷酸铁锂电池、储能电站规模为8.8 MW/23.47 MWh时,储能电站已基本能覆盖其固定成本和运营成本,此时固定成本为7819.69万元,全寿命周期总净现值为7830.21万元,投资回报率约为0.135%。

4)算例4:不同电池循环寿命下储能参与调频市场收益。

保持储能电站的电池类型、电池循环效率、储能电站规模及放电容量不变,分析不同电池循环次数下储能电站参与调频市场的收益情况时,通过模拟改变电池的循环寿命次数仿真可得到不同电池循环寿命次数下的收益结果,如图6所示。

从图6可以看出,储能电站参与调频市场投资回报与收益率随着储能电站电池的循环寿命次数增大而增大,当电池类型为磷酸铁锂电池、电

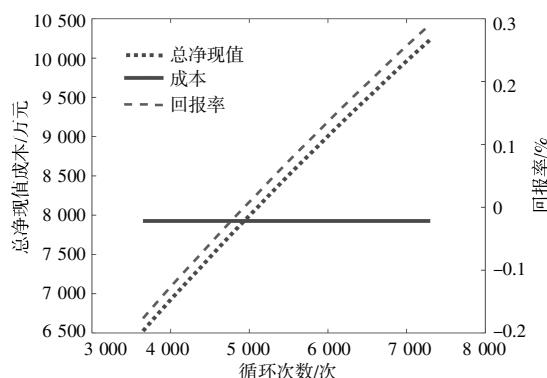


图6 不同电池循环寿命下的储能电站收益

池循环寿命次数达到4934次时,储能电站已基本能覆盖其固定成本和运营成本,此时固定成本为7926万元,全寿命周期总净现值为7925.55万元,投资回报率约为-0.006%。

电池价格通常占到储能电站投资总成本的一半。从测算评估而言,磷酸铁锂电池因其循环次数优于铅碳电池,能够在调频市场中获得更高的投资回报率。但对比物理特性而言,锂电池存在一定的安全隐患。因此,建议在环境条件良好、没有特殊安全需求的地区优先选择磷酸铁锂电池作为储能电池。此外,考虑到电池的全寿命周期(5~8年)一般低于其他电气设备(约15年),可通过更换电池继续进行储能站运维,从而提高后续年份的投资回报率。

4 结论

基于储能电池的电池衰减和电池寿命计算模型,参考PJM电力市场的储能电站AGC调频指令及荷电量变化情况和浙江电力市场某月典型方式的仿真调频里程和容量价格数据进行复盘分析,得到主要结论如下:

1)在当前浙江电力市场环境下,储能参与辅助服务市场具有较好经济效益,部分储能电站已基本具备回收其固定投资和运营成本的能力。但储能电站电池包括多种类型,且成本相差较大,同时本文计算存在一定的简化与模拟化,后续将通过推动储能电站参与浙江现货市场结算试运行的调频辅助服务市场,进一步验证相关结论。

2)电池放电容量、电池充放电循环次数、储能电站规模对储能电站的投资回报和收益率影响较大;储能电站参与调频市场投资回报与收益率

随着额定功率的增加先增后减;储能电站参与调频市场投资回报与收益率随着储能电站规模的增大而增大,随着电池循环寿命次数增大而增大。

3)储能电站应优先选择电池循环效率高,电池充放电循环次数高的电池。在额定容量不变的情况下,需合理选择电化学储能电站的放电容量,过低和过高的放电容量均会降低储能电站的投资回报率。同时,在条件允许且放电容量选择适合的情况下,设计时需尽可能提高储能电站的规模,利用规模效应提高储能电站的投资收益。

参考文献

- [1] 孙冰莹,杨水丽,刘宗歧,等.国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J].电力系统自动化,2017,41(11):8-16.
- [2] 李欣然,黄际元,陈远扬,等.大规模储能电源参与电网调频研究综述[J].电力系统保护与控制,2016,44(7):145-153.
- [3] 喻洁,刘云仁,杨家琪,等.美国加州辅助服务市场发展解析及其对我国电力市场的启示[J].电网技术,2019,43(8):2711-2717.
- [4] 田伟,施航,曹阳,等.美国电力市场最新特点及对中国的启示[J].中国电力,2019,52(9):126-133.
- [5] 国家发展改革委,财政部,科学技术部,工业和信息化部,国家能源局.关于促进储能技术与产业发展的指导意见[EB/OL].http://www.gov.cn/xinwen/2017-10/11/content_5231130.htm.
- [6] 陈浩,贾燕冰,郑晋,等.规模化储能调频辅助服务市场机制及调度策略研究[J].电网技术,2019,43(10):3606-3617.
- [7] HE G, CHEN Q, KANG C, et al. Optimal bidding strategy of battery storage in power markets considering performance-based regulation and battery cycle life[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(5):2359-2367.
- [8] KAZEMI M, ZAREIPOUR H. Long-term scheduling of battery storage systems in energy and regulation markets considering battery's lifespan[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6):6840-6849.
- [9] MA X, ZHANG H, SUN C, et al. An optimal strategy of electrolyte flow rate for vanadium redox flow battery[J]. Journal of Power Sources, 2012, 203:153-158.
- [10] XU B, ZHAO J, ZHENG T, et al. Factoring the cycle aging cost of batteries participating in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(2):2248-2259.
- [11] BRIAT O, VINASSA J M, BERTRAND N, et al. Impact of calendar life and cycling ageing on supercapacitor per-

- formance[J].IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009,58(8):3917-3929.
- [12] HASHMI M U, LABIDI W, BUŠIĆ A, et al. Long-term revenue estimation for battery performing arbi-trage and ancillary services[C]. 2018 IEEE Inter-national Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids, Aalborg, 2018:1-7.
- [13] FANG L, ZHANG F, DENG H, et al. Revenue evaluation of grid-scale battery storage in zhejiang under different operating schemes[C]//2020 4th International Conference on HVDC (HVDC). IEEE, 2020:463-467.
- [14] 刘畅, 李德鑫, 吕项羽, 等. 储能电站商业运营模式探索及经济性分析[J]. 电器与能效管理技术, 2020(10):16-20.
- [15] 张宇宁, 王海云, 刘树伟. 多代理粒子群算法光储电站控制策略[J]. 四川电力技术, 2020, 43(5):27-31.
- [16] 宋远军, 何凯, 石进永, 等. 基于成本分析的用户侧储能方案经济性评估模型研究[J]. 电器与能效管理技术, 2020(5):86-90.
- [17] 余中平, 关洪浩, 孟高军. 脉冲负载下电网储能电池最优容量配置方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(9):122-126.
- [18] 侯力枫. 提高风储发电经济性的双储能系统模型预测控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(5):97-106.
- [19] 齐军, 王小海, 侯佑华, 等. 适用于蒙西电网的大规模储能技术分析[J]. 内蒙古电力技术, 2019, 37(4):1-6.
- [20] 严海波, 康林贤, 周冬. 考虑随机性的微电网日前调度与储能优化模型[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(11):61-65.
-
- 收稿日期: 2021-06-29; 修回日期: 2021-08-27
- 作者简介: 章 枫(1991), 男, 工程师, 主要从事电力市场运营与电力市场仿真方面的工作。
- (本文编辑: 徐 晗)