

# 退役电池梯次利用对新能源消纳影响的研究

樊国旗<sup>1</sup>, 吕盼<sup>2</sup>, 樊国伟<sup>2</sup>, 黄健<sup>1</sup>, 陈浩<sup>3</sup>, 王衡<sup>2</sup>, 陈梓翰<sup>1</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司金华供电公司, 浙江 金华 321001;  
2. 新疆电力公司, 乌鲁木齐 830011; 3. 国家电网公司华东分部, 上海 200120)

**摘要:** 为提高退役电池梯次利用收益, 建立了退役电池平抑新能源功率预测误差模型和改善等效负荷峰谷差模型。首先分析新能源功率预测误差的影响以及新能源波动对等效负荷峰谷差和等效负荷波动率的影响, 然后设计退役电池能量管理系统, 通过小波包分解方法将低频能量分量分配给退役电池, 并根据等效负荷大小确定退役电池充放电时间和功率。最后利用实际算例仿真, 结果表明提出的退役电池梯次利用模型可以提高新能源功率预测准确率、改善峰谷特性、降低等效负荷波动率, 并大幅提高收益。

**关键词:** 退役电池梯次利用; 等效负荷波动率; 新能源预测准确率

文章编号: 1007-1881(2021)03-0121-06

DOI: 10.19585/j.zjdl.202103018

中图分类号: TM714

文献标志码: B

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Effect of Second-use of Retired Batteries on New Energy Consumption

FAN Guoqi<sup>1</sup>, LYU Pan<sup>2</sup>, FAN Guowei<sup>2</sup>, HUANG Jian<sup>1</sup>, CEHN Hao<sup>3</sup>, WANG Heng<sup>2</sup>, CHEN Zihan<sup>1</sup>

(1. State Grid Jinhua Power Supply Company, Jinhua Zhejiang 321001, China;  
2. State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830011, China;  
3. East China Power Grid Cooperation, Shanghai 200120, China)

**Abstract:** To improve the utilization benefits of second-use of retired batteries, this paper establishes a retired battery to stabilize the new energy prediction error model and improve the equivalent load peak-valley difference model. Firstly, the paper analyzes the impact of new energy prediction errors and the impact of fluctuation on the peak-valley difference and the fluctuation rate of the equivalent load; secondly, the paper designs a retired battery energy management system to distribute low-frequency energy components to the retired battery through the wavelet packet decomposition method, and the charge and discharge time and power of the retired battery are determined according to the equivalent load; finally, examples are used for simulation and the results show that the second-use model of retired batteries can improve the accuracy of new energy prediction, improve the peak and valley characteristics, reduce the equivalent load fluctuation rate, and greatly increase the profits.

**Keywords:** second-use of retired batteries; equivalent load fluctuation rate; new energy prediction accuracy

## 0 引言

电动汽车电池使用5~8年后, 电池容量约为额定容量的70%<sup>[1]</sup>, 而目前的回收处理产业链与生产不匹配, 未能消化大量退役电池。根据预测, 我国2020年退役废旧电池达25 GWh<sup>[2]</sup>, 如果能够将退役电池梯级利用, 则不仅能够提高电网

稳定性和调节能力, 更能解决目前退役电池处理能力不足的问题。

文献[2-3]从性能和经济性上评估了退役电池梯次利用的可行性; 文献[4]通过聚类算法对退役电池分类, 从而改进退役电池模组性能; 文献[5]利用分级控制策略提高退役电池经济性, 减少弃风; 文献[6]利用滑动平均法分离预测风电功率波动分量, 提高退役电池使用寿命, 并减少风电波动; 文献[7]对退役电池在峰谷电价和容量电费收益方面进行评估; 文献[8]利用退役电池降低公

交车充电站运营和投资成本,为含退役电池电动汽车大规模接入提供调度参考。

在目前退役电池梯次利用方法的研究中,退役电池利用功能单一,为提高退役电池使用效率,本文提出平抑新能源功率预测误差模型和改善系统峰谷差模型,针对新能源功率预测误差,利用小波包分解出低频能量型分量;针对新能源增大系统峰谷差问题,通过退役电池低谷充电、高峰放电的方法,减小峰谷差,获得调峰收益;通过实际算例表明,该退役电池利用方法可以大幅提高退役电池项目收益,为实际退役电池梯次利用提供指导意义。

## 1 新能源并网影响

### 1.1 新能源功率预测误差问题

新能源功率预测分为中长期功率预测、短期功率预测、超短期功率预测和实时功率预测。中长期功率预测为电量预测;新能源超短期功率预测准确度较高,对调度计划作用最大,某地新能源超短期功率预测误差和新能源预测功率误差率如图1所示。

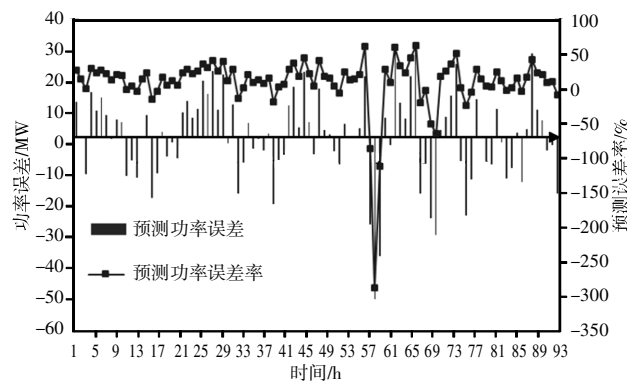


图1 新能源超短期功率预测

由图1可知,功率预测误差最大为-50 MW,预测误差率为288.6%;预测平均相对误差功率为11.2 MW,预测相对误差率为20.3%。

调度机构需要购买其他资源平抑新能源功率预测误差来实现功率平衡,因此新能源需要支付预测误差惩罚成本。

新能源预测平均相对误差  $\varepsilon'$  为:

$$\varepsilon' = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{|P_{N,t} - P_{N,r,t}|}{P_{N,t}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $P_{N,t}$  为新能源实际功率;  $P_{N,r,t}$  为新能源预测功率。

新能源功率预测惩罚成本  $C_{N,c}$  为:

$$C_{N,c} = \sum_{t=1}^T |P_{N,t} - P_{N,r,t}| \cdot c_{N,c} \quad (2)$$

式中:  $c_{N,c}$  为新能源预测功率与实际功率的惩罚成本。

### 1.2 新能源对负荷特性影响

某日负荷、新能源和等效负荷如图2所示。

$$P_{L,eq,t} = P_{L,t} - P_{N,t} \quad (3)$$

式中:  $P_{L,t}$  为负荷功率;  $P_{L,eq,t}$  为等效负荷功率。

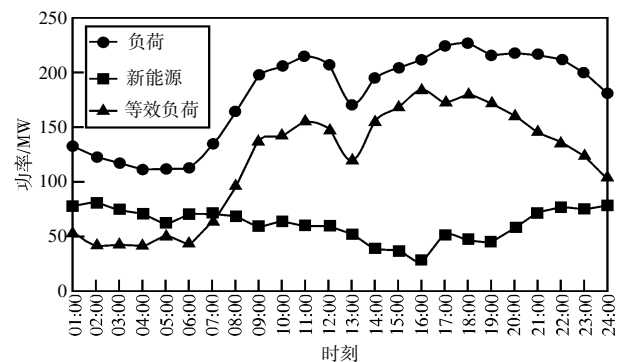


图2 某日负荷及新能源曲线

由图2可知,负荷较大的16:00—20:00时段,新能源功率较小,提供电力支援能力较弱;而负荷较小的1:00—5:00时段,新能源功率较大,起到“反调峰”作用。新能源并网增大等效负荷峰谷差,需要更多的调峰能力。

等效负荷峰谷差  $\delta$  反映等效负荷的波动程度,等效峰谷差越小,等效负荷波动程度越低,需要参与机组调峰能力越小。

$$\delta = P_{L,eq}^{\max} - P_{L,eq}^{\min} \quad (4)$$

式中:  $P_{L,eq}^{\max}$  为等效负荷功率最大值;  $P_{L,eq}^{\min}$  为等效负荷功率最小值。

等效负荷波动率  $V_{L,eq}$  反映等效负荷的平稳程度<sup>[9]</sup>,等效负荷波动率越小,等效负荷越平稳,则下网功率越平稳,对应需要的机组AGC(自动发电控制)参与调节越少。

$$V_{L,eq} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (P_{L,eq,t} - \bar{P}_{L,eq})^2}}{\sqrt{P_{L,eq,1} \cdot P_{L,eq,2} \cdots P_{L,eq,t}}} \quad (5)$$

式中:  $\bar{P}_{L,eq}$  为等效负荷功率算术平均值。

## 2 退役电池梯次利用促进新能源消纳研究

### 2.1 退役电池梯次利用能量管理系统

常规电池利用时电池电量相同, 且当前电量和原设计电量相同, 充/放电功率和电量平均分配。退役电池梯次利用时, 回收的电池规格不同, 电池原设计电量可能不同; 且由于电池耗损不一样, 可用电量可能不同; 此外退役电池充/放电功率可能不同, 其充/放电功率和电量不能平均分配。退役电池和常规电池容量区别如图3所示。

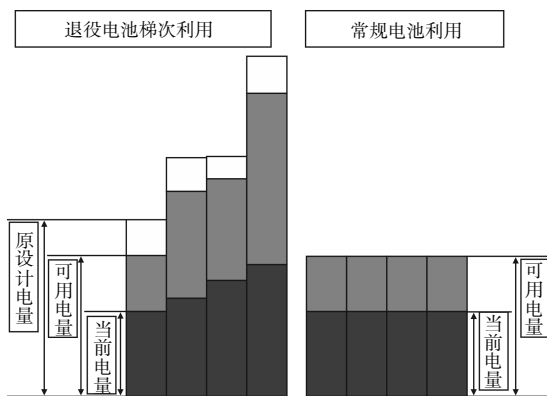


图3 退役电池与常规电池容量区别

针对退役电池容量和功率的不同, 设计了退役电池梯次利用能量管理系统, 该系统可对退役电池的电量 and 功率分配进行管理。等效负荷较大时段, 退役电池放电削峰; 等效负荷较小时段, 退役电池充电填谷。新能源预测功率大于新能源实际功率时, 退役电池充电; 新能源预测功率小于新能源实际功率时, 退役电池放电。该能量管理系统功率和电量分配如图4所示。电量和功率分配如式(6)、式(7)所示。

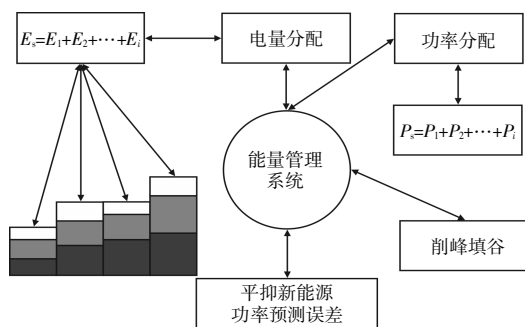


图4 能量管理系统

$$E_{S,t} = E_{S,1,t} + E_{S,2,t} + \dots + E_{S,i,t} \quad (6)$$

$$P_{S,t} = P_{S,1,t} + P_{S,2,t} + \dots + P_{S,i,t} \quad (7)$$

式中:  $E_{S,t}$  为电池充/放电总电量;  $E_{S,i,t}$  为第  $i$  电池充/放电电量;  $P_{S,t}$  为电池充/放电总功率;  $P_{S,i,t}$  为第  $i$  电池充/放电功率。

### 2.2 平抑新能源预测误差控制策略

平抑新能源预测误差的控制目标为: 新能源预测惩罚成本最小, 即新能源预测误差序列绝对值的和最小。

$$\min \sum_{t=1}^T |P_{w,t}| \quad (8)$$

$$P_{w,t} = P_{N,t} - P_{N,r,t} \quad (9)$$

式中:  $P_{w,t}$  为新能源实际功率和新能源预测功率的差值序列。

平抑新能源预测误差控制策略为: 根据新能源预测功率和新能源实际功率差值生成新能源预测功率误差序列<sup>[9]</sup>, 利用小波包分解将新能源预测功率误差序列分解为高频功率型分量和低频能量型分量<sup>[10]</sup>, 最后通过能量管理系统分配电量和功率。低频能量型分量由退役电池存储和释放, 为提高退役电池使用寿命, 高频能量型分量不处理, 只对低频能量分量存储和释放, 高频功率分量不处理; 以 1 min 作为功率型和能量型响应分界时间点, 对应的响应频率为 0.016 7 Hz。误差序列分解方法如图5所示。

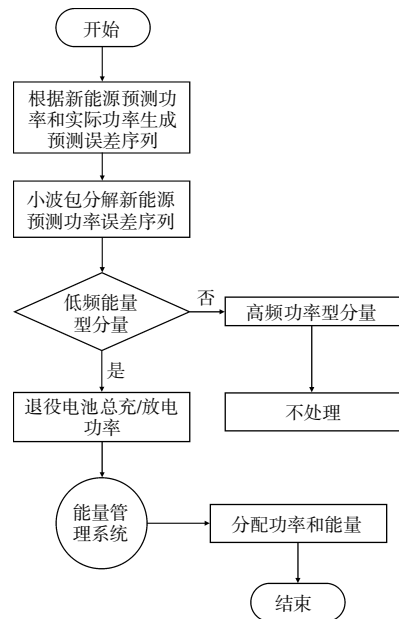


图5 平抑新能源预测误差控制策略流程

对误差序列进行小波包分解，得到低频分量和高频分量，以小波包层数为3，得到的误差序列分解如图6所示。将小波包序列分解，当某个序列频率高于响应频率时，之前低频率序列为低频能量型分量，分配给退役电池；之后高频率序列为高频功率型分量，不处理。

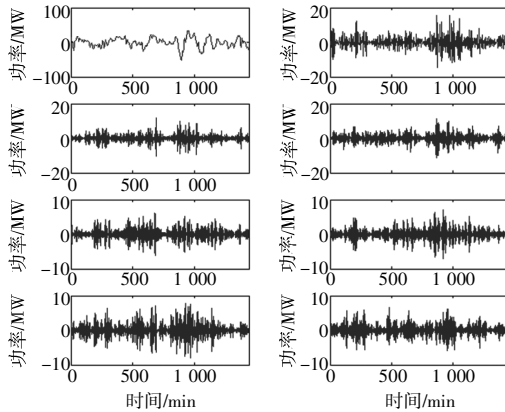


图6 误差序列小波包分解

新能源预测功率高于新能源实际功率，且该差值小于退役电池最大充电功率时，若退役电池电量不大于最大电量，退役电池充电，充电功率为该差值；若退役电池电量大于最大电量，充电功率为0。新能源实际功率高于新能源预测功率，且该差值小于退役电池最大放电功率时，若退役电池电量不大于最大电量，退役电池放电，放电功率为该差值；若退役电池电量大于最大电量，放电功率为0。

$$\begin{cases} P_{S,C,t} = P_{N,r,t} - P_{N,t} \\ E_{S,t} \leq E_S^{\max} \end{cases}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} P_{N,r,t} - P_{N,t} \leq P_{S,C}^{\max} \\ P_{S,C,t} = 0 \\ E_{S,t} > E_S^{\max} \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_{S,F,t} = P_{N,t} - P_{N,r,t} \\ E_S^{\min} \leq E_{S,t} \end{cases}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} P_{N,t} - P_{N,r,t} \leq P_{S,F}^{\max} \\ P_{S,F,t} = 0 \\ E_{S,t} < E_S^{\min} \end{cases}, \quad (13)$$

式中： $E_S^{\min}$ 和 $E_S^{\max}$ 分别为退役电池当前最小和最大电池电量； $P_{S,C,t}$ 和 $P_{S,F,t}$ 为退役电池充/放电总功率。

### 2.3 平抑等效负荷波动控制策略

平抑等效负荷波动的控制目标为：充/放电效

益 $R_S$ 最大。

$$\max R_S, \quad (14)$$

$$R_S = R_{S,F} - R_{S,C}, \quad (15)$$

$$R_{S,F} = \sum_{t=1}^T P_{S,F,t} \cdot c_{\text{峰}}, \quad (16)$$

$$R_{S,C} = \sum_{t=1}^T P_{S,C,t} \cdot c_{\text{谷}}, \quad (17)$$

式中： $C_{S,C}$ 为充电成本； $P_{S,F,t}$ 为放电功率； $P_{S,C,t}$ 为充电功率； $c_{\text{峰}}$ 为峰时段电价； $c_{\text{谷}}$ 为谷时段电价。

平抑等效负荷波动控制策略为：根据新能源和负荷数据生成等效负荷序列，然后利用 $K$ 均值聚类算法( $K=3$ )确定等效负荷峰谷平时段，当预等效负荷不满足电量条件的充/放电功率时，修改预等效负荷充/放电功率至满足条件，最后通过能量管理系统分配电量和功率。平抑等效负荷波动控制策略如图7所示。

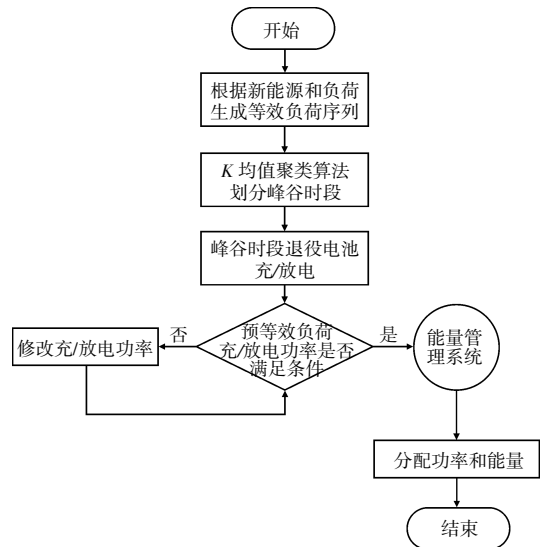


图7 平抑等效负荷波动控制策略流程

在等效负荷峰时段，退役电池放电，放电功率为等效负荷功率与预等效负荷功率差值。在等效负荷谷时段，退役电池充电，充电功率为预等效负荷功率与等效负荷功率差值。

$$\begin{cases} P_{S,F,t} = P_{L,eq,t} - P_{YL,eq,t} \\ P_{L,eq,t} = \text{峰} \end{cases}, \quad (18)$$

$$\begin{cases} P_{S,C,t} = P_{YL,eq,t} - P_{L,eq,t} \\ P_{L,eq,t} = \text{谷} \end{cases}, \quad (19)$$

式中： $P_{YL,eq,t}$ 为退役电池充/放电后的预等效负荷功率。

## 2.4 约束条件

功率平衡约束为:

$$P_{L,t} + P_{S,C(F),t} = P_{X,t} + P_{N,t} \quad (20)$$

式中:  $P_{X,t}$  为下网功率。

电池充/放电功率约束为:

$$|P_{S,C(F)}^{\min}| \leq |P_{S,C(F),t}| \leq |P_{S,C(F)}^{\max}| \quad (21)$$

式中:  $P_{S,C(F)}^{\max}$  和  $P_{S,C(F)}^{\min}$  分别为充/放电最大、最小功率, 充电功率记为正, 放电功率记为负。

电池电量  $E_{S,t}$  约束为:

$$E_S^{\min} \leq E_{S,t} \leq E_S^{\max} \quad (22)$$

电池电量状态:

$$E_{S,t+1} = E_{S,t} + \eta_c \cdot P_{S,S,C,t} - \eta_F \cdot P_{S,S,F,t} \quad (23)$$

式中:  $\eta_c$  和  $\eta_F$  分别为电池充/放电系数。

## 3 算例分析

某地区新能源装机容量 100 MW, 退役电池组容量 25 MW/50 MWh, 电池最大电量为 0.9, 最小电量为 0.1; 负荷最大功率 225.9 MW, 负荷最小功率 111.3 MW, 峰谷差为 114.6 MW; 联络线最大下网功率为 300 MW, 最大上网功率为 200 MW; 新能源功率预测惩罚成本为 250 元/MWh, 尖峰电价为 1 200 元/MWh, 谷电价为 288 元/MWh。其负荷、新能源、等效负荷曲线如图 2 所示。

### 3.1 平抑新能源功率预测误差收益

新能源功率预测误差序列分解为 6 层 64 个分量满足条件。误差序列分解为功率分量和能量分量, 如图 8 所示。

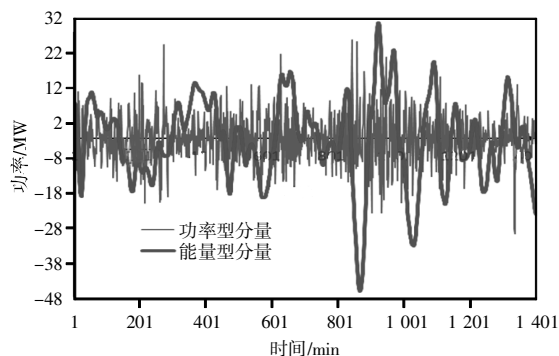


图 8 功率型分量和能量型分量

由图 8 可知, 功率分量波动较为频繁, 而退役电池能量分量波动相对平缓。

电池利用前后的新能源功率预测误差率对比如图 9 所示。

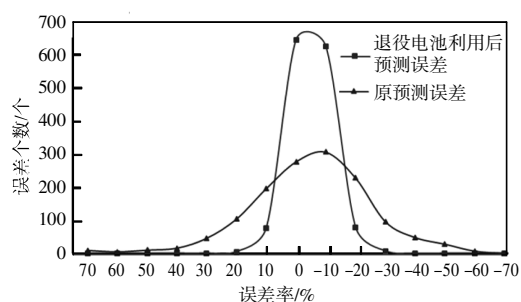


图 9 退役电池利用前后误差率对比

由图 9 可知, 退役电池利用后误差率绝对值主要分布在小于 10% 范围内, 新能源预测平均相对误差率绝对值为 8.03%, 相比原新能源预测平均相对误差率绝对值降低 12.27 个百分点, 提高 60.45% 的新能源功率平均预测的精度。

原新能源功率预测惩罚成本为 67 031 元, 电池利用后新能源功率预测惩罚成本为 28 901 元, 该成本减少 38 130 元。

### 3.2 等效负荷改善效益

退役电池梯次利用后等效负荷与原始等效负荷如图 10 所示。

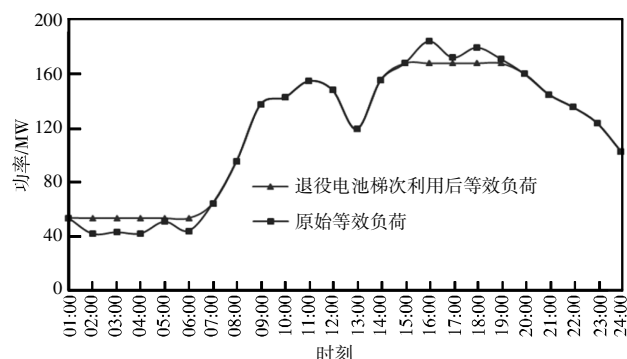


图 10 退役电池利用前后等效负荷对比

由图 10 可知, 原始等效负荷最大为 184 MW, 原始等效负荷最大为 41.5 MW, 峰谷差为 142.5 MW, 相比不含新能源仅负荷系统峰谷差增大 27.9 MW。原最大等效负荷为 167.4 MW, 电池利用后最小等效负荷为 114.4 MW, 相比原等效负荷峰谷差减小 28.1 MW, 降低 16.8%; 相比不含新能源仅负荷系统峰谷差减小 0.2 MW。

不含新能源等效负荷波动率为 0.233 44, 含新能源等效负荷波动率为 0.474 39, 电池利用后波动率为 0.417 86。相比电池利用前波动率降低 11.92%。

### 3.3 充/放电收益

退役电池容量状态和充/放电功率见图 11。

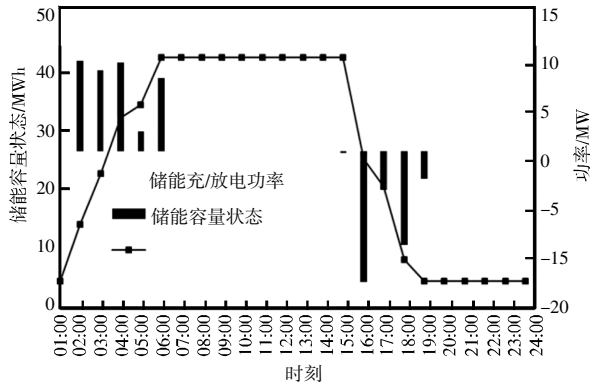


图 11 储能容量状态及充/放电功率曲线

由图 11 可知,退役电池低谷时段充电电量为 44.5 MWh,充电成本为 12 816 元;高峰时段放电电量为 36 MWh,放电收益为 43 200 元;退役电池充/放电产生的收益为 30 384 元。总收益为 68 514 元,相比于仅提高新能源功率预测准确率收益提高了 79.7%,相比于仅平抑等效负荷波动收益提高了 125.5%。

## 4 结语

本文设计的退役电池能量管理系统可以解决退役电池电量和功率不相同的问题。退役电池梯次利用可以提高 60.45% 的新能源功率预测平均精度,降低 16.8% 的峰谷差,降低 11.92% 的等效负荷波动率。相较于单一退役电池利用方法,本文方法相较于仅峰谷电价提高了 125.5% 的收益,相较于仅平抑新能源功率预测误差提高了 79.7% 的收益。

### 参考文献:

[1] 谢宝江,姜伟明,罗扬帆,等.基于  $H_{\infty}$  无迹卡尔曼滤波

的退役锂离子电池 SOC 估计[J].浙江电力,2020,39(8):53-60.

- [2] 吴星宇,阮丁山,唐盛贺,等.退役动力锂离子电池梯次利用概述[J/OL].电池,[2020-12-08].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1129.tm.20201202.1325.004.html>.
- [3] 徐懋,刘东,王德钊.退役磷酸铁锂动力电池梯次利用分析[J].电源技术,2020,44(8):1227-1230.
- [4] 高崧,朱华炳,刘征宇,等.基于 K-means 聚类的退役动力电池梯次利用成组方法[J].电源技术,2020,44(10):1479-1482.
- [5] 王凯丰,谢丽蓉,乔颖,等.基于退役电池阈值设定和分级控制的弃风消纳模式[J].电力自动化设备,2020,40(10):92-98.
- [6] 崔传世,谢丽蓉,包洪印,等.平抑风电功率波动退役电池储能系统容量配置[J].电源技术,2020,44(8):1185-1190.
- [7] 吴威,唐雨晨,叶荣,等.不同场景下基于 AHP-TOPSIS 退役电池梯次利用综合评价[J].电网与清洁能源,2020,36(4):115-122.
- [8] 郭世泉.含退役电池梯次利用的公交车充电站优化配置及运营[D].北京:华北电力大学,2019.
- [9] 方绍凤,周任军,张武军,等.源-荷协整关系与电价时间序列协整模型[J].电力自动化设备,2020,40(2):169-176.
- [10] 周任军,李斌,黄婧杰,等.含源荷相似度和曲线波动度约束的源荷储协调优化模型[J].中国电机工程学报,2020,40(13):4092-4102.
- [11] 李宏仲,张仪,孙伟卿.小波包分解下考虑广义储能的风电功率波动平抑策略[J/OL].电网技术,[2020-06-23].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0514>.

收稿日期:2020-12-08

作者简介:樊国旗(1993),男,助理工程师,研究方向电力系统调度与新能源消纳。

(本文编辑:徐 晗)