

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181295

# 基于禁忌搜索算法的储能电池盈利模式优化策略研究

朱青<sup>1</sup>, 梁广平<sup>1</sup>, 任建国<sup>2</sup>, 张敏<sup>3</sup>, 顾元沛<sup>3</sup>

(1. 中国电建集团河北省电力勘测设计研究院有限公司, 河北省电力勘测设计工程技术研究中心, 河北 石家庄 050031;  
2. 华润电力控股有限公司, 广东 深圳 581000; 3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 针对储能电池现阶段经济效益较差、规模发展受限等问题, 提出一种利用禁忌搜索算法的盈利模式优化策略。首先, 分析了储能技术的不同投资主体差异和电价机制。在此基础上, 为用户侧或第三方投资主体设计一种同时考虑净负荷和电价机制的盈利模式。然后, 以储能电池日盈利最大为目标建立储能盈利模式的优化模型, 应用禁忌搜索算法求解电池日前充放电功率。最后, 算例对比分析了盈利模式和传统运营模式的经济效益, 结果表明所提出的盈利模式经济性更优。

**关键词:** 储能电池; 净负荷; 电价机制; 盈利模式; 禁忌搜索算法

## Research on optimization model of energy storage battery profit mode based on Tabu search algorithm

ZHU Qing<sup>1</sup>, LIANG Guangping<sup>1</sup>, REN Jianguo<sup>2</sup>, ZHANG Min<sup>3</sup>, GU Yuanpei<sup>3</sup>

(1. Hebei Electric Survey Design Engineering & Technology Research Center, Power China Hebei Electric Power Design & Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050031, China; 2. China Resources Power Holdings Company Limited, Shenzhen 581000, China; 3. School of Electric & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of energy storage batteries' poor economic efficiency and limited scale development at present, this paper proposes a profit model optimization strategy based on Tabu search algorithm. Firstly, the differences among energy storage technology's different investors and the electricity price mechanism are analyzed. On this basis, a profit model considering the net load and electricity price mechanism is designed for the user side or third party investors. Then, to maximize the daily profit of energy storage battery, an optimization model of energy storage profit model is established, and the Tabu search algorithm is applied to solve the battery's charge and discharge power. Finally, the economic benefits of profit model and traditional operation model are compared by examples, the results show that the profit model proposed in this paper is more economical.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2018JQ01), National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904003) and Key Program of Power China's Ministry of Science and Technology (No. KJ-2017-100).

**Key words:** energy storage battery; net load; electricity price mechanism; profit model; Tabu search algorithm

## 0 引言

目前, 储能电池大规模发展仍然受限, 主要因素并非在于储能自身技术和并网技术, 而是在于其自身经济效益。储能电池成本过高导致其投资较大, 且受自身运营模式和实际电价政策多方面影响导致

其盈利较低, 最终造成储能电池的经济效益较差<sup>[1-4]</sup>。因此, 如何在现有政策下改善储能的运营模式、提高电池的经济效益, 以实现储能电池规模化应用是一个亟需解决的问题。

国内外学者针对储能电池盈利模式的3个关键环节展开了大量的研究。在储能的投资主体方面, 文献[5]从发电侧、电网侧和用电侧等不同角度结合电价结构分析储能的运营模式, 并针对其应用技术、发展模式和市场机制等方面提出储能应用的发展建议; 文献[6]分别针对电网侧、用户侧、发电侧和第

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金项目资助(2018JQ01); 国家重点研发计划专项课题(2018YFB0904003); 中国电力建设集团科技部重点项目资助(KJ-2017-100)

三方投资的四种储能投资主体建立经济效益计算模型,并提出四种商业运营模式下的经济效益计算方法。在储能的运营模式方面,文献[7]提出了一种针对工业园区用户侧电池储能系统的运营模式,并设计投资方/运营方、电费计量和结算方式;文献[8]针对海岛独立型微电网特点从技术和成本角度分析了储能类型,研究适合海岛独立微电网的储能商业运营模式。在储能的经济效益方面,文献[9]基于不同投资主体,着重分析电网侧和新能源电厂侧电池储能系统的经济性,并量化储能各方面的收益和成本;文献[10]结合不同储能技术在电力系统中的应用,建立储能在不同收益模式下的收益模型,同时分析了储能经济性研究的几种主流方法及其优缺点。

现有研究仅限于定性分析储能盈利模式,为有效提高储能电池的盈利水平,需将盈利模式与运行方式结合进行定量分析,为此本文提出一种利用禁忌搜索算法的盈利模式优化策略。首先,本文分析了不同储能投资主体的差异和电价机制,在此基础上,为用户侧或第三方投资主体设计一种同时考虑净负荷和电价机制的盈利模式。然后,以储能电池日盈利最大为目标建立储能盈利模式的优化模型,应用禁忌搜索算法求解电池日前充放电功率。最后,以某智慧园区为例应用禁忌搜索算法求解储能电池盈利模式优化模型,算例对比分析了盈利模式和传统运营模式的经济效益,结果表明本文提出的盈利模式经济性更优。

## 1 储能电池盈利模式设计

### 1.1 投资主体分析

储能技术投资主体主要分为发电侧投资、电网侧投资、用户侧投资以及第三方投资四类投资主体。

发电侧投资模式是由发电(含新能源)公司全额投资储能装置。储能系统应用于发电侧<sup>[11]</sup>,可作为火力发电的旋转备用,平滑新能源出力以提高电能质量,以及作为备用电源减少新能源等<sup>[12]</sup>。

电网侧投资模式是由电网公司全额投资,从电网自身需求出发,为解决特定问题而安装储能装置。一般由电网投资的储能项目容量较大,直接经济效益较差。电网投资的储能系统,具有延缓电网建设、降低网损、减少系统停电量损失以及调峰调频等辅助服务作用<sup>[13]</sup>。

用户侧投资模式是由用户全额投资储能装置。用户侧投资的储能系统,可减少用户的电量/容量费用,降低因停电造成的用户停电损失,同时用户侧储能可进行需求响应,对负荷实现削峰填谷<sup>[14]</sup>。用

户侧储能可通过峰谷电价差盈利,为自身带来可观的直接经济效益<sup>[15]</sup>。

第三方投资模式是由第三方机构全额投资储能装置,其收益全部归第三方机构所有。前文所述的三种投资模式均从自身利益角度出发,为解决其自身问题而进行储能项目建设。第三方投资储能系统储存的电能可供多方同时使用,实现了发电侧、电网侧、用户侧三方的利益共享。

不同投资方对储能技术实现功能的要求各不相同,其所对应的经济效益也各不相同。发电侧储能注重平抑电源出力波动,电网侧储能侧重于辅助服务,调峰调频,延缓输配电设备的改造升级,用户侧储能针对负荷的削峰填谷和需求响应,第三方投资储能重点在于盈利的多寡。通过对四种储能投资主体的分析,发现投资储能系统产生的隐形经济效益明显大于显性经济效益,隐形经济效益很难体现在具体的收益上。发电侧和电网侧投资的储能电池直接收益微乎其微,只有用户侧投资和第三方投资可能有直接套峰谷电价的收益,为此本文针对有提升直接收益空间的用户侧和第三方投资的储能技术设计盈利模式。

### 1.2 电价分析

在盈利模式下,储能系统的电价机制与并网型园区的电价机制相似,都有分时电价和上网电价,与并网型园区电价机制不同之处在于储能的电价增加了综合电价。盈利模式下储能系统电价机制见表1。

表1 盈利模式下储能系统电价机制

Table 1 Pricing mechanism of energy storage system under profit mode

电价机制	电价类型
购电电价	分时电价
	综合电价
售电电价	分时电价
	上网电价

分时电价<sup>[16]</sup>是指根据电网的负荷变化情况,将每天24h划分为高峰、平段、低谷等多个时段,对各时段分别制定不同的电价水平。以江苏省泰兴地区工业用电峰谷电价为例,详情见表2。

表2 江苏省现行峰谷电价机制

Table 2 Current peak valley tariff mechanism in Jiangsu Province

时段	电价/(元/(kW·h))
高峰时段(8:00—12:00、17:00—21:00)	1.069 7
平时段(12:00—17:00、21:00—24:00)	0.641 8
低谷时段(0:00—8:00)	0.313 9

上网电价是指大电网与并网型园区按照园区内各种分布式电源上网电价而设定的, 本质为电度电价, 园区盈余电量以该电价上网, 通常为一个定值。

综合电价是指园区内不同类型电源的折合电价, 该电价为所有电源成本电价的加权平均值, 其中的权重为某一阶段各电源的发电量占总发电量的比重。

$$C_{av} = \frac{\sum_{i=1}^N W_i \cdot C_{cost\_i}}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (1)$$

式中:  $C_{av}$  为园区某一时段的综合电价;  $W_i$  为第  $i$  种电源的同一时段发电量, 如风力发电、光伏发电、燃机发电等;  $C_{cost\_i}$  为对应于第  $i$  种电源的成本电价;  $N$  为所有发电电源的种类总和。

当储能充电时, 采用分时电价表明从电网购电, 采用综合电价则表明从园区电源购电; 当储能放电时, 采用分时电价表明给用户供电, 采用上网电价则表明向电网卖电。

### 1.3 兼顾净负荷的充放电原则

净负荷是指园区电负荷与总电源出力之差, 园区每日电负荷有峰有谷, 而各个电源总出力不能做到实时与负荷平衡, 因此净负荷有正有负。储能电池具有双向能量流动的特点, 通过控制其充放情况可以达到消减净负荷的目的。同时考虑到电池的经济效益, 电池应尽可能在电价低时充电、电价高时放电。

兼顾以上两者条件, 储能电池优先在净负荷小于零且电价较高时放电, 净负荷大于零且电价较低时充电; 其他情况下, 电池的充放情况由各功率约束和套电价差的收益决定, 如在净负荷小于零但电价较低时, 若此时其净负荷可由电网满足, 则电池可以低电价充电; 相反若电网无法满足其净负荷, 电池只能放电以满足功率约束。

## 2 盈利模式优化模型

将所有电源设定为可上网运行方式, 可控电源的出力要尽可能保证所有分布式电源出力和负荷的差额要低于园区与电网、园区与储能电池之间所能交换的功率(即园区电网联络线限值或储能额定功率), 以保证园区能够实现能量平衡, 否则会出现电量供应不足以及弃风弃光的现象。本文着重研究在确定预测的负荷和所有分布式电源出力后储能电池盈利模式下运行策略。盈利模式的核心部分在于确定储能电池经济效益最优的运行策略。盈利模式的优化模型是以储能电池的日收益最大为目标综合考

虑电价和净负荷的博弈来优化电池的次日充放电功率。

### 2.1 目标函数

盈利模式的目标函数为储能电池的日收益, 日收益为日售电费用和日购电费用之差:

$$\max F = C_{sell} - C_{buy} \quad (2)$$

日售电费用为

$$C_{sell} = \sum (p_{sg}(t) \times C_{S\_grid} + p_{sl}(t) \times C_{pk}(t)) \quad (3)$$

且  $p_{sg}(t) \geq 0, p_{sl}(t) \geq 0$

日购电费用为

$$C_{buy} = \sum (|p_{sg}(t)| \times C_{pk}(t) + |p_{sl}(t)| \times C_{av}) \quad (4)$$

且  $p_{sg}(t) \leq 0, p_{sl}(t) \leq 0$

式中:  $F$  为电池的日收益;  $C_{sell}$  为电池一天的售电费用;  $C_{buy}$  为电池一天的购电费用;  $p_{sg}(t)$  表示为电池与电网交易交换的功率, 以电池流向电网为正方向;  $p_{sl}(t)$  表示为电池与园区交易交换的功率, 以电池流向园区为正方向;  $C_{S\_grid}$  为园区的上网电价;  $C_{pk}(t)$  为该地的分时电价; 时间  $t$  取一天 24 h, 以 1 h 为单位。

### 2.2 约束条件

储能电池需满足下列约束条件: 功率约束条件、电池功率限制、电池容量限制、电量平衡约束以及联络线功率限制。

1) 功率平衡约束为

$$p_s(t) + \sum_{i=1}^n p_{dg\_i}(t) + p_{grid}(t) = p_{load}(t) \quad (5)$$

式中:  $p_s(t)$  为电池的功率, 正为放电, 负为充电;

$\sum_{i=1}^n p_{dg\_i}(t)$  为园区所有电源的输出功率;  $p_{grid}(t)$  为园区与电网间的交换功率(园区吸收功率为正, 反之为负);  $p_{load}(t)$  为园区的电负荷。

2) 考虑各分布式电源出力和预测电负荷的波动性和不确定性, 储能电池充放电功率应留有一定裕量, 且考虑到园区、电网与储能之间功率的流向, 电池功率限制为

$$-p_{scilit} \times \gamma \leq p_s(t) \leq p_{sdilit} \times \gamma \quad (6)$$

$$p_s(t) = p_{sg}(t) + p_{sl}(t) \quad (7)$$

$$p_{sg}(t) \times p_{sl}(t) \geq 0 \quad (8)$$

式中:  $p_{scilit}$ 、 $p_{sdilit}$  为储能电池自身最大可充/放功率;  $\gamma$  为设定裕量, 常取 75%~95%。

3) 为避免电池过充过放长期损坏电池, 设定电池容量限制<sup>[17]</sup>为

$$SOC_{\min} \leq soc(t) \leq SOC_{\max} \quad (9)$$

$$soc(t+1) = soc(t) \times (1 - \delta) - \frac{p_s(t) \times \Delta t \times \eta}{E_{\text{bess}}} \quad (10)$$

式中： $soc(t)$ 、 $soc(t+1)$ 分别为电池当前时刻和下一时刻的荷电状态<sup>[18]</sup>； $SOC_{\min}$ 、 $SOC_{\max}$ 分别为储能电池的荷电状态下限和上限<sup>[19]</sup>； $\delta$ 为电池自身的放电率； $\eta$ 为电池的转换效率； $E_{\text{bess}}$ 为电池额定容量； $\Delta t$ 取1h。

4) 电量平衡约束是指电池每日充放电电量平衡，即充电时段荷电状态变化量等于放电时段荷电状态变化量。

$$\sum_{i=1}^{n_c} \Delta soc_c = \sum_{i=1}^{n_d} \Delta soc_d \quad (11)$$

式中： $\Delta soc_c$ 、 $\Delta soc_d$ 分别为电池充电时段和放电时段荷电状态变化量； $n_c$ 、 $n_d$ 分别为电池日充电次数和放电次数。

5) 为保证电网稳定性，设定联络线功率限制<sup>[20]</sup>为

$$-p_{g\_lit} \leq p_{\text{grid}}(t) \leq p_{g\_lit} \quad (12)$$

式中， $p_{g\_lit}$ 为园区与电网联络线功率限制。

### 2.3 优化算法

禁忌搜索算法(Tabu Search, TS)是一种随机搜索算法，本文应用禁忌搜索法求解储能电池盈利模式模型的流程如图1所示。

充放电策略：在电网分时电价大前提下，电价高峰储能放电( $p_s \geq 0$ )，电价平谷储能充电( $p_s \leq 0$ )，具体储能与哪方充放电和交换电量的多少由电价的高低和净负荷大小决定。

峰时段：当净负荷大于零(即 $\Delta \text{load} > 0$ )时，储能放电，若此时净负荷大于电池放电功率上限，电池只与园区交换功率(即 $P_{sl} > 0, P_{sg} = 0$ )，电池总功率按放电功率上限放电，相反电池与园区交换功率取净负荷(即 $P_{sl} = \Delta \text{load}, P_{sg}$ 不确定)，电池总功率是否取功率上限由充电电价、放电电价、电池荷电状态决定；但当净负荷小于零(即 $\Delta \text{load} < 0$ )时，电池是否放电由充电电价、放电电价、电池荷电状态决定，放电的功率受到电网联络线功率约束。

平(谷)时段：储能电池只充不放(即 $p_s \leq 0$ )，是否充电由净负荷、联络线功率以及电池荷电状态决定，从电网还是园区余电充电由平价(谷价)和综合电价大小决定。当 $\Delta \text{load} > 0$ 时，电池只能与电网交换功率(即 $P_{sl} = 0, P_{sg} \leq 0$ )，而 $P_{sg}$ 的大小受平(谷)电价、荷电状态和联络线功率约束限制；当 $\Delta \text{load} < 0$ 时，电池可以同时与园区和电网交易交换功率(即

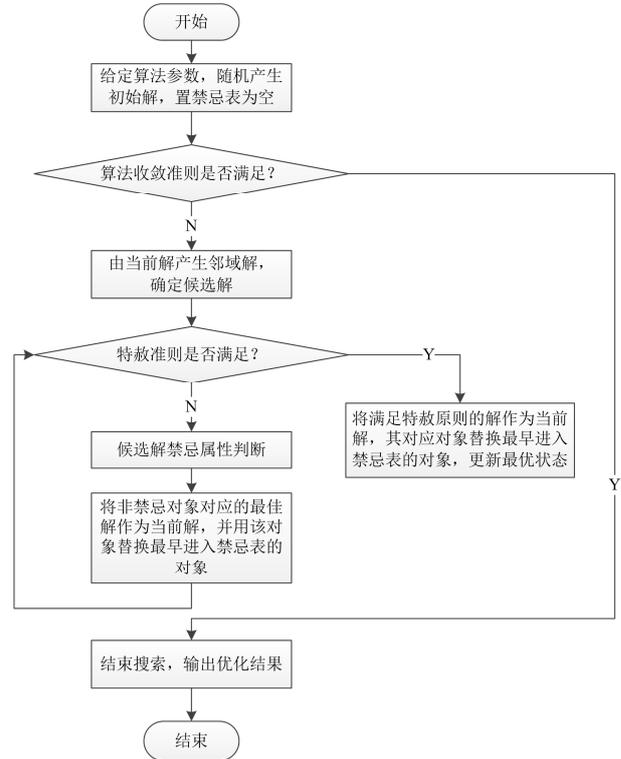


图1 禁忌搜索法实现储能电池盈利模式流程图

Fig. 1 TS to realize the flow chart of energy storage battery profit mode

$P_{sl} \leq 0, P_{sg} \leq 0$ )， $P_{sl}$ 、 $P_{sg}$ 的大小受综合电价和平(谷)电价大小影响、荷电状态和联络线功率约束限制。

本文以储能电池的充放电功率(电池与电网交易交换的功率 $P_{sg}$ 、电池与园区交易交换的功率 $P_{sl}$ )和联络线交互功率 $P_{\text{grid}}$ 为决策变量，应用禁忌搜索算法通过邻域移动和解禁忌与释放，寻找盈利模式的最优解。

### 3 算例分析

本文以江苏省泰兴地区某个含分布式电源(燃气、风机、光伏电池以及储能电池)的智慧园区为例，将现已配置的储能电池按照盈利模式运行，采取园区某日运行数据，确定电池的运行策略。该园区储能系统采用铅炭电池，其相关参数见表3，分时电价见表1，计算边界见表4。

表3 园区配置的铅炭电池参数表

Table 3 Parameter table of lead carbon battery in park

configuration				
电池类型	能量转换效率/%	自放电率/(%/月)	配置容量/MW-h	最大充(放)电功率/MW
铅炭电池	85	1.0	8.0	2.0

表 4 计算边界参数表

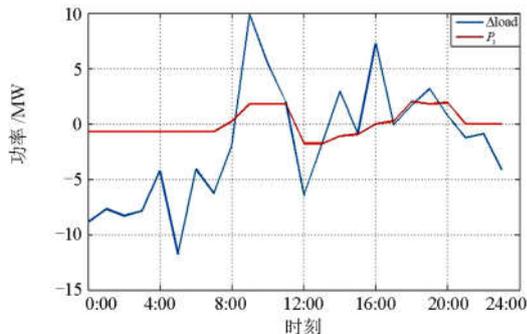
Table 4 Calculation boundary parameter table

边界参数	值
功率裕量 $\gamma$	0.9
$SOC_{min}$	0.2
$SOC_{max}$	0.8
上网电价/(元/(kW·h))	0.697 3
综合电价/(元/(kW·h))	0.306 9
联络线功率限制/MW	15

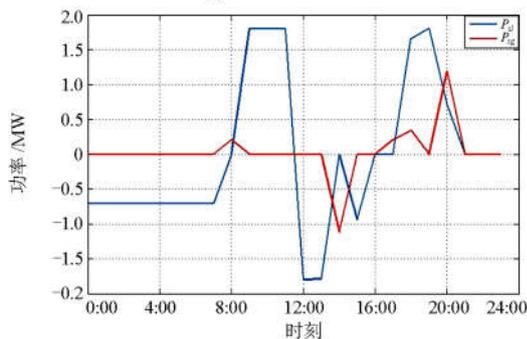
### 3.1 盈利模式禁忌搜索算法优化结果

采用电脑配置为 Intel Core i5 处理器 3 230 M, 频率为 2.6 GHz, 搜索禁忌算法平均计算耗时为 1 min。在储能盈利模式下应用禁忌搜索算法得到电池的日充放电功率计算结果如图 2 所示, 园区净负荷以及电池充放电功率见表 5。

由图 2(a)可以看出: 在 0:00—8:00 谷时段净负荷小于 0, 由于园区综合电价低于电网谷电价, 故采用园区余电给电池充电; 在 8:00—12:00 峰时段园区净负荷第一个过零点在 9:00 后, 8:00—9:00 间园区净负荷小于零, 由于上网电价大于综合电价, 此时储能电池放电按上网电价结算有盈利效果, 9:00—12:00 净负荷大于 0 时, 电池以最大可能功率放电按峰电价结算; 12:00—17:00 平时段, 由于平电价大于综合电价, 电池优先用园区余电充电, 不



(a) 铅炭电池充放电情况



(b) 铅炭电池流向园区/电网功率结果

图 2 储能电池盈利模式优化结果

Fig. 2 Energy storage battery profit model optimization results

表 5 储能电池盈利模式下日充放电功率

Table 5 Daily charge and discharge power in energy storage

battery profit mode			
时段/h	园区净负荷	电池与园区交	电池与电网交
	$\Delta P_{load}/MW$	换功率 $P_{st}/MW$	换功率 $P_{sg}/MW$
0-1	-8.889 0	-0.706 0	0.000 0
1-2	-7.701 9	-0.706 0	0.000 0
2-3	-8.313 9	-0.706 0	0.000 0
3-4	-7.870 0	-0.706 0	0.000 0
4-5	-4.261 4	-0.706 0	0.000 0
5-6	-11.767 6	-0.706 0	0.000 0
6-7	-4.099 5	-0.706 0	0.000 0
7-8	-6.304 4	-0.706 0	0.000 0
8-9	-1.998 8	0.000 0	0.209 6
9-10	9.890 1	1.800 0	0.000 0
10-11	5.464 6	1.800 0	0.000 0
11-12	1.955 9	1.800 0	0.000 0
12-13	-6.482 8	-1.800 0	0.000 0
13-14	-1.791 1	-1.791 1	0.000 0
14-15	2.923 2	0.000 0	-1.114 3
15-16	-0.942 3	-0.942 3	0.000 0
16-17	7.259 5	0.000 0	0.000 0
17-18	-0.086 2	0.000 0	0.209 6
18-19	1.662 4	1.662 4	0.337 6
19-20	3.148 3	1.800 0	0.000 0
20-21	0.706 0	0.706 0	1.194 0
21-22	-1.276 3	0.000 0	0.000 0
22-23	-0.924 3	0.000 0	0.000 0
23-24	-4.141 2	0.000 0	0.000 0

足部分从电网购电; 17:00—21:00 第二个峰时段与 8:00—12:00 第一个峰时段相似; 21:00—24:00 平时段考虑到一天内再无峰时段不进行充放。

由图 2(b)可知 24 h 内不同时段电池流向园区或电网的功率情况, 净负荷小于 0 时, 谷时段(平时段)由于综合电价小于谷电(平电), 电池功率由园区流入, 峰时段充电电价小于上网电价, 电池功率流向电网; 净负荷大于 0 时, 平谷时段电池功率由电网流入, 峰时段电池功率流向园区, 对应表 5 中各时段功率大小。

### 3.2 电价机制对优化电池日充放电曲线的影响

3.1 节中各电价大小为综合电价<谷价<平价<上网电价<峰价。考虑到燃机发电量比重较大且风光发电波动性大, 园区电源综合电价亦有一定的波动性, 使得综合电价可以大于谷价但不会大于平电。以综合电价为 0.324 4 元/(kW·h)为重新优化储能的盈利模式, 其电池充放电情况如图 3(a)所示。园区的上网电价是园区发电运营商与电网共同设定的, 上网电价对盈利模式电池充放电有一定影响。以上网电价为 0.621 3 元/(kW·h)为重新优化储能的盈利模式, 其电池充放电情况如图 3(b)所示。

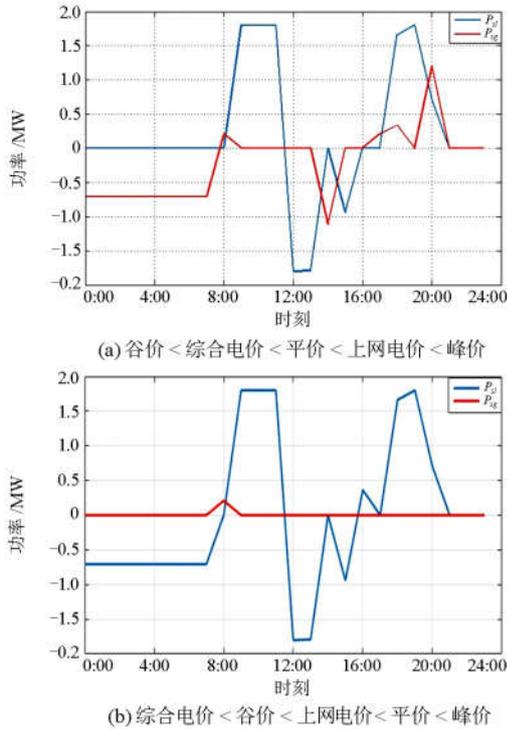


图3 铅炭电池流向园区/电网功率结果

Fig. 3 Lead carbon battery flow to the park / grid power results

对比图3和图2(b)电池两部分充放电功率情况,可以发现综合电价适当增大后在谷时段电池功率从 $P_{sl}$ 转移到 $P_{sg}$ ,电池优先用谷电充电;上网电价适当下降后使得平—峰时段间电池 $P_{sg}$ 减小,甚至当上网电价小于平价时电池 $P_{sg}$ 降为0,储能无法从用平电充再按上网电价卖给电网的方式中实现盈利。

### 3.3 与传统模式对比分析

传统模式下储能电池运行仅依靠峰谷电价差盈利,本文为储能电池设计的盈利模式综合考虑各种电价大小和园区净负荷正负影响。与传统模式相比,盈利模式带来的经济效益更高,盈利模式和传统模式的经济效益对比见表6。

表6 储能电池日运营盈利模式/传统模式经济指标

Table 6 Energy storage battery daily operating profit model / traditional model economic indicators

电池日盈利分析	盈利模式	传统模式
日购电费/万元	0.384 0	0.539 8
日售电费/万元	1.159 6	1.232 2
日收益/万元	0.772 9	0.692 4

由表6可知,在传统模式下储能电池的日售电费用虽高于盈利模式,但在盈利模式下电池的日购电费用较其低很多,总体来看盈利模式的日收益略高,长久以此盈利模式的优势日渐明显。

本节算例求解电池在盈利模式下的日充放电功率较为合理,有效地增大电价套利的经济效益。盈利模式涉及多优化变量非线性规划,而禁忌搜索算法可解决线性规划、非线性规划以及大规模的优化问题,表明其求解优化问题的可行性。

## 4 结论

本文提出一种利用禁忌搜索算法的盈利模式优化方法,该方法具有以下特点。

- 1) 综合考虑净负荷和电价机制的影响,兼顾储能的技术性和经济性。
- 2) 以储能日收益最大为目标,考虑电池自身功率、容量限制以及外部电网功率限制,求解电池的充放电功率。
- 3) 在维持园区能量平衡基础上,综合比较综合电价、分时电价和上网电价,定量求解电池与园区或电网交换的功率。

## 参考文献

[1] 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 Xiaoqing, LI Jianlin, HUI Dong. Capacity allocation and economic evaluation of energy storage system for power grid peak-filling and valley filling[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(2): 1-5.

[2] 李建林, 修晓青, 吕项羽, 等. 储能系统容量优化配置及全寿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, LÜ 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.

[3] 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 Xiong, YE Lin, YANG Rengang. 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.

[4] 马会萌, 李蓓, 李建林, 等. 面向经济评估的电池储能系统工况特征量嵌入性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 70-77.  
MA Huimeng, LI Bei, LI Jianlin, et al. Embedded research on working condition characteristics of battery energy storage system for economic evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 70-77.

[5] 唐西胜. 储能在电力系统中的作用与运营模式[J]. 电力建设, 2016, 37(8): 1-7.  
TANG Xisheng. Applications and marketing mode of energy storages in power system[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8): 1-7.

- [6] 杨建林, 黄一超, 费斐, 等. 不同商业运营模式下储能技术经济效益分析研究[J]. 电气技术, 2018, 19(3): 80-84.  
YANG Jianlin, HUANG Yichao, FEI Fei, et al. Research of economic benefits of energy storage technique under different business operational modes[J]. Electrical Engineering, 2018, 19(3): 80-84.
- [7] 马溪原, 周长城, 刘育权, 等. 工业园区用户侧电池储能系统运营模式及其经济性分析[J]. 南方电网技术, 2018, 12(3): 44-51.  
MA Xiyuan, ZHOU Changcheng, LIU Yuquan, et al. Business mode and economic analysis of user-side battery energy storage system in industrial parks[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(3): 44-51.
- [8] 赵波, 王成山, 张雪松. 海岛独立型微电网储能类型选择与商业运营模式探讨[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 21-27.  
ZHAO Bo, WANG Chengshan, ZHANG Xuesong. A survey of suitable energy storage for island stand-alone microgrid and commercial operation mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 21-27.
- [9] 孙丰杰, 马静, 徐加银, 等. 不同投资主体电池储能系统的经济性[J]. 电池, 2018, 48(2): 117-121.  
SUN Fengjie, MA Jing, XU Jiayin, et al. Economic of battery energy storage system with different investment entities[J]. Battery Bimonthly, 2018, 48(2): 117-121.
- [10] 刘畅, 徐玉杰, 张静, 等. 储能经济性研究进展[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(5): 1084-1093.  
LIU Chang, XU Yujie, ZHANG Jing, et al. Research progress in economic study of energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(5): 1084-1093.
- [11] 施琳, 罗毅, 涂光瑜, 等. 考虑风电场可调度性的储能容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 120-127.  
SHI Lin, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Energy storage sizing method considering dispatchability of wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 120-127.
- [12] 汪海蛟, 江全元. 应用于平抑风电功率波动的储能系统控制与配置综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 126-135.  
WANG Haijiao, JIANG Quanyuan. An overview of control and configuration of energy storage system used for wind power fluctuation mitigation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 126-135.
- [13] 刘文霞, 牛淑娅, 石道桂, 等. 考虑运行策略及投资主体利益的主动配电系统储能优化配置[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2697-2704.  
LIU Wenxia, NIU Shuya, SHI Daogui, et al. Optimal allocation of ADS battery energy storage considering operation strategy and investment subject benefit[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2697-2704.
- [14] 周楠. 基于需求响应的光伏微网储能系统多目标容量优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1709-1716.  
ZHOU Nan. Multi-objective capacity optimization configuration of photovoltaic microgrid energy storage system based on demand response[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1709-1716.
- [15] 施泉生, 姜瑞合. 考虑投资主体利益的区域配电网储能系统经济性分析[J]. 科技和产业, 2016, 16(11): 121-125.  
SHI Quansheng, JIANG Ruihe. Economic analysis of regional distribution network BESS considering investment subject benefit[J]. Science Technology and Industry, 2016, 16(11): 121-125.
- [16] 丁宁, 吴军基, 邹云. 基于DSM的峰谷时段划分及分时电价研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 9-12, 16.  
DING Ning, WU Junji, ZOU Yun. Research of peak and valley time period partition approach and TOU price on DSM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23): 9-12, 16.
- [17] GAO Y, XUE F, YANG W, et al. Optimal operation modes of photovoltaic-battery energy storage system based power plants considering typical scenarios[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 397-406. DOI: 10.1186/s41601-017-0066-9.
- [18] 张峰, 张熙. 基于荷电状态动态调整的储能电站容量规划[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 20-25.  
ZHANG Feng, ZHANG Xi. BESS capacity planning based on dynamic SOC adjustment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 20-25.
- [19] 李秀磊, 耿光飞, 季玉琦, 等. 考虑实际运行的配电网电池储能系统的优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 88-94.  
LI Xiulei, GENG Guangfei, JI Yuqi, et al. Study on optimal allocation of battery energy storage in distribution network considering the actual operation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 88-94.
- [20] 杨秀, 陈洁, 朱兰, 等. 基于经济调度的微网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 53-60.  
YANG Xiu, CHEN Jie, ZHU Lan, et al. Optimization allocation of energy storage for microgrid based on economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 53-60.

收稿日期: 2018-10-18; 修回日期: 2019-03-07

作者简介:

朱青(1981—), 女, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为能源互联网、电气设计技术; E-mail: 13331393528@126.com

梁广平(1971—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为能源互联网、电气设计技术;

任建国(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事火电及新能源发电、综合能源系统、电力市场等方面的规划设计与技术开发工作。

(编辑 周金梅)