

1-2-2019

## Modeling and Analysis of Operation Benefit for Electric Vehicle Battery Swapping Station

Weiqing Sun

*1.School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; ;*

Shunfeng Chen

*1.School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; ;*

Liu Tong

*1.School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; ;*

Xiaodong Wu

*2.Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Modeling and Analysis of Operation Benefit for Electric Vehicle Battery Swapping Station

## Abstract

**Abstract:** The operators of electric vehicle battery swapping stations (EVBSS) seek the maximization of benefit by optimizing the modeling. The changes of operating parameters such as battery swapping demand could affect EVBSS benefits. A linear programming model for EVBSS maximum benefit is established. Based on the sensitivity analysis, *it is found that the EVBSS benefit is mainly affected by operating parameters such as battery swapping price, battery depreciation cost, electricity price, etc. For power grid, the sensitivity parameters of peak load shifting are charging-pile number and battery number. The optimal quantity of EVBSS internal infrastructure investment is analyzed.* The establishment and analysis of the model can provide the decision-making basis for commercial operation of EVBSS.

## Keywords

electric vehicle, battery swapping station, linear optimization, sensitivity analysis, sensitive parameter

## Recommended Citation

Sun Weiqing, Chen Shunfeng, Liu Tong, Wu Xiaodong. Modeling and Analysis of Operation Benefit for Electric Vehicle Battery Swapping Station[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2): 731-739.

# 电动汽车换电站运营效益建模与分析

孙伟卿<sup>1</sup>, 陈顺风<sup>1</sup>, 刘通<sup>1</sup>, 吴小东<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 上海电器科学研究院, 上海 200063)

**摘要:** 电动汽车换电站运营方通过优化建模追求效益的最大化, 但换电需求量等运营因素随时可能发生变化, 这些因素的改变会对换电站最终的收益造成不同程度的影响。建立电动汽车换电站运营效益最大化的线性模型, 通过灵敏度分析得出: 对换电站而言, 影响换电站效益的敏感参数主要为充换电服务费、电池折旧费、电网电价; 对电网而言, 影响换电站削峰填谷的敏感参数则是换电站内的总电池数和充电格位数。分析换电站内部设施投资的最优数量。此模型的建立及其分析能够为换电站商业化运营提供决策依据。

**关键词:** 电动汽车; 换电站; 线性优化; 灵敏度分析; 敏感参数

中图分类号: TM910.6

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 02-0731-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201802044

## Modeling and Analysis of Operation Benefit for Electric Vehicle Battery Swapping Station

Sun Weiqing<sup>1</sup>, Chen Shunfeng<sup>1</sup>, Liu Tong<sup>1</sup>, Wu Xiaodong<sup>2</sup>

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

**Abstract:** The operators of electric vehicle battery swapping stations (EVBSS) seek the maximization of benefit by optimizing the modeling. The changes of operating parameters such as battery swapping demand could affect EVBSS benefits. A linear programming model for EVBSS maximum benefit is established. Based on the sensitivity analysis, it is found that the EVBSS benefit is mainly affected by operating parameters such as battery swapping price, battery depreciation cost, electricity price, etc. For power grid, the sensitivity parameters of peak load shifting are charging-pile number and battery number. The optimal quantity of EVBSS internal infrastructure investment is analyzed. The establishment and analysis of the model can provide the decision-making basis for commercial operation of EVBSS.

**Keywords:** electric vehicle; battery swapping station; linear optimization; sensitivity analysis; sensitive parameter

## 引言

传统化石能源的过度使用不但使得能源日渐枯竭, 而且还会带来了温室效应、环境污染等一系

列问题<sup>[1]</sup>。据统计, 全世界 50% 以上的原油是被汽车消耗的, 因此, 发展电动汽车技术对改善环境污染问题和减缓全球变暖都是大有益处的<sup>[2]</sup>。

随着电动汽车的发展, 电动汽车的数量快速增加, 若对电动汽车的充电行为不加以管理, 放任其无序充电就会危害电力系统的安全运行并导致负荷无序增长<sup>[3]</sup>。而充电负荷的复杂性主要取决于用户的出行需求、使用习惯、电池特性、充电设施、



收稿日期: 2016-01-29 修回日期: 2016-05-03;  
基金项目: 上海市科委青年科技英才“扬帆计划”研究项目(14YF1410100);  
作者简介: 孙伟卿(1985-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统优化控制与运行、智能电网; 陈顺风(1990-), 男, 硕士生, 研究方向为智能电网需求侧管理。

电动汽车数量和充电控制方式等因素<sup>[4]</sup>。因为充电负荷与用户的出行习惯等因素相关,这使得充电负荷具有峰谷特性,若对无序充电行为加以管理则能起到削峰填谷的作用<sup>[5-6]</sup>。用有序充电的方式能够使电动汽车负荷避开白天的高峰转而在夜间低谷时段充电<sup>[7]</sup>。文献[8]研究得出有序充电方式能够减少电网受到电动汽车接入的影响。文献[9]基于蒙特卡洛方法对电动汽车的充电负荷的分布情况进行了分析,并研究了各时段满足换电充裕度条件下的换电站储备电池数量。文献[10]考虑了换电站大量接入电网会影响电力系统可靠性的这一问题,并针对这一问题提出了换电站与电网机组组合的模型。

文献[11-13]研究了电动汽车的运行规律,通过对电动汽车的运行规律的研究能够为换电站选址和最优充放策略起到指导作用。文献[14]列出了充电站规划所要考虑的因素,建立了模型并对各参数做了灵敏度分析,得出了充电站定址分容的敏感参数。文献[15]基于能量等效方式进行负荷预测,进而定址定容,并且评估了充电站的经济性与便利性,得到可行的规划方案。

文献[16]分析了在不同的电价定价机制下换电站的收益情况,并且证实了有序的充放电行为不仅可以提高换电站收益还能增加电网削峰填谷的能力。文献[17]研究了换电站的成本效益问题,建立了成本效益模型并做了灵敏度分析,得出换电站收益的敏感参数。

本文首先建立电动汽车换电站的线性规划模型,然后对模型中的各关键参数进行灵敏度分析,得出了影响换电站收益的敏感参数<sup>[18]</sup>。然后分析得出影响换电站削峰填谷的关键因素是总电池数和充电格位数。其中,充电格位是指电动汽车换电站内专门为电池充电的设备,一个充电格位可为一块电池充电。当配置电池组和充电格位时,需要满足最低的换电服务需求,而作为一项投资,也要同时兼顾其经济效益。本文的分析结果能够为换电站商业化提供决策依据。

## 1 电动汽车换电站运营效益模型

本文基于一定的建设条件<sup>[16]</sup>,建立如下电动汽车换电站最优运营效益模型。

$$\max F = (\alpha - \alpha_0)N + \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{T_m} \lambda_t P'_{\max} W_t^i + \lambda CN - \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{T_m} \lambda_t P'_c M_t^{(i)} - \alpha_0 A \quad (1)$$

s.t.

$$N_t + J_t + K_t + M_t + W_t = Z \quad (2)$$

$$\begin{cases} M_t^{(1)} + M_t^{(2)} + \dots + M_t^{(T_m)} = M_t \\ M_t^{(1)} = M_{t+1}^{(2)}, M_t^{(2)} = M_{t+1}^{(3)}, \dots, M_t^{(T_m-1)} = M_{t+1}^{(T_m-2)} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} W_t^{(1)} + W_t^{(2)} + \dots + W_t^{(T_m)} = W_t \\ W_t^{(1)} = W_{t+1}^{(2)}, W_t^{(2)} = W_{t+1}^{(3)}, \dots, W_t^{(T_m-1)} = W_{t+1}^{(T_m-2)} \end{cases} \quad (4)$$

$$X_t + M_t^{(T_m)} + J_t = N_{t+1} + X_{t+1} + W_{t+1}^{(1)} + J_{t+1} \quad (5)$$

$$N_t + W_t^{(T_m)} + K_t = M_{t+1}^{(1)} + K_{t+1} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{T_m} M_t^{(i)} \leq M_{\max} \quad (7)$$

式中:式(1)为优化目标函数,式(2)为换电站总电池数平衡约束,式(3)为换电站内充电电池数量平衡约束,式(4)为换电站内放电电池数量平衡约束,式(5)为换电站内满电量电池数量平衡约束,式(6)为换电站内空电池数量平衡约束,式(7)为换电站内充电格位数量约束。

模型中各参数的含义如下: $\alpha$ 是用户一次租赁电池的费用或者是到换电站充电的服务费用; $\alpha_0$ 是换电站内电池一次充电或放电时所需要的折旧费; $\lambda$ 是换电零售价; $C$ 是电池标准容量; $\eta_c$ 是电池充电效率。 $A$ 是单位时间内电池充放电的循环次数; $C_i$ 是第*i*次获利的电池电量,并且 $C_i \leq C$ 。 $N_t$ 是在第*t*时段的电动汽车用户到换电站换电的需求量; $J_t$ 和 $K_t$ 分别是第*t*时段换电站内满电量的电池数和空电量的电池数; $Z$ 是换电站内全部电池的数量。 $T_m$ 是电池充满电所需要的时间段数,即单个电池需要 $T_m$ 个充程才能使电池完全充满电; $T_w$ 是电池放完电所需的时间段数,即单个电池需要 $T_w$ 个放程才能使电池完全放完电。 $M_t^{(T_m)}$ 是换电站内第*t*时段的第 $T_m$ 充程的充电电池数量。 $W_t^{(T_w)}$ 是换

电站内第  $t$  时段的第  $T_w$  放程的放电电池数量。  $X_t$  是备用电池数量。  $M_{\max}$  是充电格位总数量。

以上最优模型的含义为: 在满足换电站换电需求及电池充放电特性的前提下, 使得换电站的运营收益最大化。

电动汽车到达换电站进行换电服务时, 需向换电站缴纳的换电费用  $p = \alpha + \lambda C$ 。

模型中的优化变量为: 第  $t$  时段的满电量电池数  $J_t$ 、第  $t$  时段的空电量电池数  $K_t$ 、第  $t$  时段的第  $T_m$  充程的充电电池数量  $M_t^{(T_m)}$  和第  $t$  时段的第  $T_w$  放程的放电电池数量  $W_t^{(T_w)}$ 。

## 2 灵敏度分析

以上优化模型中的部分换电站运营参数, 如各时段换电需求、电网电价等, 是基于一定的预测得出的, 是实际运营中可能产生误差, 而这些误差可能会对换电站收益产生较大影响。因此, 开展灵敏度分析, 找出影响换电站收益的敏感参数, 就显得十分必要。

当换电站模型中的一些参数变化时, 例如电池折旧费、总电池数等, 可以用单纯形法重新求解, 查看最优解是否变化, 此方法最早由 Spendley 等人提出<sup>[19]</sup>。由于单纯形法的迭代计算是将一组基向量转化为另一组基向量, 每次迭代得到的值只随基向量的不同而变化, 所以可以把一些参数的变化直接通过最优单纯形表得出。

线性规划模型标准形式如下所示。

$$\max \quad Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \quad a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \quad (9)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2 \quad (10)$$

⋮

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m \quad (11)$$

$$x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

其中式(8)为目标函数一般式,  $c_n$  是目标函数中各变量的系数。式(9)~(12)为模型的约束条件, 其中  $a_n$  和  $b_n$  分别是约束条件中的各变量系数和等式右端常数项。

在求解线性规划问题时要先判断其是否为标准形式, 如果不是标准形则需要先将其转化为标准形。引入松弛变量作为基变量  $X_B$ ,  $X_B = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ 。原问题中的决策变量作为非基变量  $X_N$ ,  $X_N = (x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n)$ 。同样地, 将目标函数中变量的系数分为基变量系数  $C_B$  和非基变量系数  $C_N$ ,  $C_B = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ ,  $C_N = (c_{m+1}, c_{m+2}, \dots, c_n)$ 。约束方程组中的基变量系数是一个单位矩阵  $(P_1, P_2, \dots, P_m)$ 。得出初始基可行解。若约束条件中若出现有等式约束的情况时, 则可用大  $M$  法去求解<sup>[18]</sup>。

用式(13)进行最优性检验。

$$\sigma_j = c_j - \sum_{i=1}^m c_i a_{ij} \quad (13)$$

若检验数  $\sigma_j \leq 0$  则得到最优解; 若大于零则最大检验数  $\sigma_k$  对应的变量  $x_j$  就作为入基变量然后继续迭代,  $\sigma_k$  的计算公式为式(14)。

$$\sigma_k = \text{Max}_j \{ \sigma_j \mid \sigma_j > 0 \} \quad (14)$$

将  $b$  列分别除以  $P_k$  的同行数字得到  $\theta$ , 其计算公式为式(15)。

$$\theta = \text{Min}_i \left\{ \frac{b_i}{a_{ik}} \mid a_{ik} > 0 \right\} = \frac{b_l}{a_{lk}} \quad (15)$$

得到最小  $\theta$  值后, 与最小  $\theta$  值对应的  $a_{lk}$  的基变量作为出基变量, 出入基替换后得到新的解再检验最优性。绘制出最优单纯形表。

当约束条件的右端常数项  $b$  发生改变, 假定只有一个  $b_r$  发生变化, 从  $b_r$  变为  $b_r'$ ,  $b_r' = b_r + \Delta b_r$ , 此时右端项  $b$  变为  $\bar{b}$ 。最优基不变的充要条件是  $B^{-1}(b + \Delta b) \geq 0$ , 式中的  $B^{-1}$  是最优单纯形表中松弛变量在约束条件中的系数矩阵。若要使得最优基不变则  $b_r$  的取值范围就如式(16)所示。

$$\text{Max} \left\{ \frac{-\bar{b}_i}{x_{ir}} \mid x_{ir} \geq 0 \right\} \leq \Delta b_r \leq \text{Min} \left\{ \frac{-\bar{b}_i}{x_{ir}} \mid x_{ir} \leq 0 \right\} \quad (16)$$

如果约束条件的右端常数项  $b$  的变化超出这个范围, 最优基改变时, 就需要重新计算。

当约束条件中的右端常数项  $b_i$ 、目标函数中的变量系数  $c_i$  和约束条件系数  $a_{ij}$  同时改变, 此时  $b_i$ 、 $c_i$  和  $a_{ij}$  分别变为  $\bar{b}_i$ 、 $\bar{c}_i$  和  $\bar{a}_{ij}$ 。其中  $B^{-1}$  没有发生变

化, 最优解和最值改变, 此时的基变量的解和目标函数最值的计算式分别如式(17)、(18)所示。

$$X_B = B^{-1}\bar{b} \quad (17)$$

$$Z = C_B B^{-1}\bar{b} \quad (18)$$

计算出  $X_B$  后, 则得到基本解  $X=(X_B, 0)^T$ 。当确认了此解为可行解之后, 则得出此基本可行解即为最优解。

单纯形表的基本框架如表 1 所示。

表 1 单纯形表  
Tab. 1 simplex tableau

	$C_j$		$c_1$	...	$c_m$	...	$c_j$	...	$c_n$
$C_B$	基	$b$	$x_1$	...	$x_m$	...	$x_j$	...	$x_n$
$c_1$	$x_1$	$b_1$	1	...	0	...	$a_{1j}$	...	$a_{1n}$
$c_2$	$x_2$	$b_2$	0	...	...	...	$a_{2j}$	...	$a_{2n}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$c_i$	$x_i$	$b_i$	...	...	...	...	$a_{ij}$	...	$a_{in}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$c_m$	$x_m$	$b_m$	0	...	1	...	$a_{mj}$	...	$a_{mn}$
	$\sigma_j$		0	...	0	...	$c_j - \sum_{i=1}^m c_i a_{ij}$	...	$c_n - \sum_{i=1}^m c_i a_{in}$

### 3 算例分析

假设某一换电站一天 24 h 的换电总需求量为 2 000 车次, 站内电池和充电格位数分别为 1 200 个和 450 个(情况 1)。根据文献[20]的研究, 电池一次充放电的折旧费为  $\alpha_0=9$  元; 充满电池的电量需要  $T_m=2$  h; 放完电池的电量需要  $T_w=1$  h。电网 24 小时各时段的电价如表 2 所示。此分时电价和换电需求量是通过文献[21]中的分时电价曲线和负荷预测曲线进行一定的调整后拟合所得。

表 2 电网 24 h 电价  
Tab. 2 electricity price in 24h

$t$	电价/元	$t$	电价/元
1	0.30	13	0.40
2	0.25	14	0.45
3	0.25	15	0.50
4	0.30	16	0.60
5	0.40	17	0.65
6	0.60	18	0.75
7	0.70	19	0.85
8	0.75	20	0.90
9	0.70	21	0.85
10	0.65	22	0.75
11	0.50	23	0.50
12	0.45	24	0.40

在情况 1 的条件之下, 通过最优模型计算, 换

电站 24 h 最大收益为 19 437 元。进而对电动汽车换电站内的各个参数做灵敏度分析, 通过式(19)计算得到换电站各运营参数与换电站收益间的灵敏度关系如表 3 所示。

表 3 灵敏度分析  
Tab. 3 sensitivity analysis

参数	换电站收益
换电服务费	20
电池折旧费	-20.53
总电池数	4.02
充电格位数	9.48

由表 3 可见, 提高换电服务费, 降低电池折旧费, 增加换电站电池数或充电格位数, 均能增加换电站收益。在情况 1 的条件之下, 每次只变动一个参数, 其变动程度在  $\pm 40\%$  之间, 其余各参数都不改变。而电价的变化规则按照在提升时段 7、8、9、19、20、21 这些峰时段电价的 10%~40% 的同时, 减少时段 1、2、3、4 这些谷时段 10%~40% 的电价; 在减少时段 7、8、9、19、20、21 这些峰时段电价的 10%~40% 的同时, 增加时段 1、2、3、4 这些谷时段 10%~40% 的电价。在此变动规则之下去分析单个参数的变化对换电站总盈利的影响情况, 得出的换电站收益的最值如表 4 所示。当换电站总电池

数增加 10%, 此时换电站效益模型中各优化变量的最优解如表 5 所示。

表 4 各参数变化后换电站收益  
Tab. 4 EVBSS benefits after the operating parameters changed

变化程度/%	换电站收益/元			
	电价	换电服务费	总电池数	电池折旧费
-40	16495	9837	15315	27371
-30	16894	12237	17060	25285
-20	17676	14637	18244	23318
-10	18457	17037	18955	21356
0	19437	19437	19437	19437
10	20637	21837	19777	17529
20	22243	24237	19873	15639
30	24299	26637	19873	13839
40	27784	29037	19873	12039

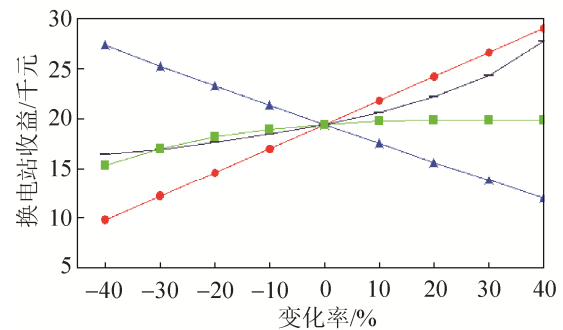
将表 4 中的数据转换成曲线图就能够直观地看到换电站内各参数对换电站收益的影响程度, 如图 1 所示。在情况 1 的条件之下, 分别对换电站内的电池数和充电格位数这两个参数进行灵敏度分析, 如图 2~3 所示。

表 5 换电站 24 小时运营参数  
Tab. 5 EVBSS operation data during 24h

t/h	$M_t^{(1)}$	$M_t^{(2)}$	$W_t^{(1)}$	$J_t$	$K_t$	t/h	$M_t^{(1)}$	$M_t^{(2)}$	$W_t^{(1)}$	$J_t$	$K_t$
1	50	400	0	0	800	13	360	90	0	760	0
2	400	50	0	380	450	14	80	360	0	800	0
3	50	400	0	400	430	15	0	80	0	1110	60
4	400	50	0	740	60	16	0	0	0	1030	110
5	0	400	0	730	110	17	0	0	0	820	250
6	0	0	0	1020	170	18	0	0	0	680	450
7	0	0	0	860	270	19	0	0	0	590	600
8	0	0	0	730	420	20	0	0	240	300	700
9	0	0	0	640	550	21	0	0	0	220	1000
10	0	0	0	590	650	22	0	0	0	110	1080
11	360	0	0	540	350	23	50	0	0	50	1130
12	90	360	0	490	310	24	400	50	0	0	800

由图 1~3 可见, 各因素影响换电站收益的灵敏度从高到低依次为: 充换电服务费, 电池折旧费, 电价, 充电格位数, 总电池数。充换电服务费是影

响换电站收益的第一因素, 其对换电站收益的灵敏度最高。由于一段时间内, 换电站的换电需求量是相对固定的, 因此增加充换电服务费之后换电站收益呈等比例直线上升。影响换电站收益的第二因素是电池折旧费, 电池折旧费与换电站收益呈反比。随着电池技术的发展, 电池使用寿命的增加, 电池折旧费降低, 会使换电站获得较大收益。影响换电站收益的第三因素是电网电价, 电价对换电站的收益曲线类似于指数函数曲线, 电价的提升幅度越大, 换电站收益的提升也越明显。



— 电价 — 换电服务费 — 电池折旧费 — 总电池数

图 1 各参数变化时换电站收益的变化趋势

Fig. 1 Changes of EVBSS benefits when each of the operating parameters changed

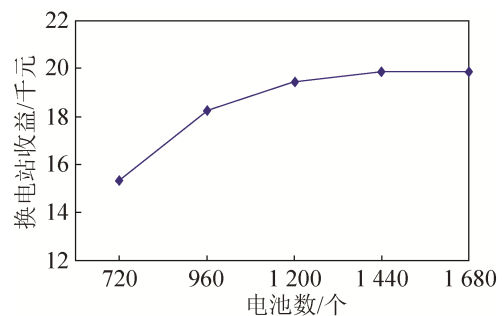


图 2 总电池数改变时换电站收益的变化趋势

Fig. 2 Changes of EVBSS benefits when the battery number changed

相比前三个参数而言, 换电站总电池数和充电格位数对换电站带来的收益则不那么明显。当总电池数在增加了 20% 之后换电站收益完全饱和, 不再增长。总电池数对换电站收益的曲线收敛, 当电池数为 1380 个时, 此时换电站收益达到最大值, 为 19873 元。类似地, 换电站收益随着充电格位数的



增加而逐渐趋向于饱和。当充电格位数为 1 169 个时, 换电站收益取到最大值, 为 22 106 元。

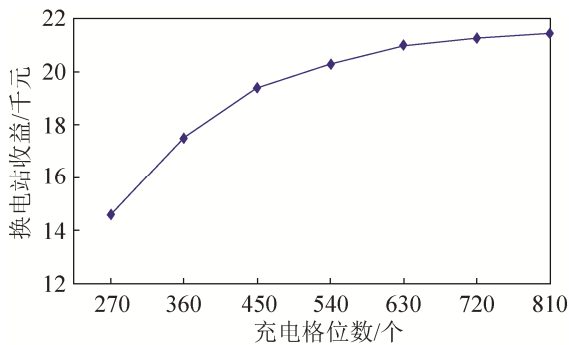


图3 充电格位数改变时换电站收益的变化趋势

Fig. 3 Changes of EVBSS benefits when the charging-pile number changed

以上结果与文献[17]的研究结果基本一致。文献[17]把净现值(net present value, NPV)作为评估指标对电动汽车换电站做单因素敏感性分析, 得出了影响换电站收益的敏感参数依次为: 充换电服务价格、电池租凭费用、购电电价折扣、贷款利率。但文中却未涉及换电站内部的电池及充电格位的管理及这两个参数的灵敏度分析。本文对换电站内电池和充电格位的管理进行了分析, 并对这两个参数做了灵敏度分析。经过分析得出, 这两个参数对换电站收益的影响是较小的。

即使某单个因素对换电站收益的影响再高, 都不能只单一地调整某单个因素, 而忽略了各个因素之间的相互制约作用。随着未来电动汽车的不断发展, 换电需求量也会随之增加, 但换电站削峰填谷的能力将会降低, 向电网卖电获得盈利的能力变差。情况 1 的 24 h 换电站功率如图 4 所示, 在图中标记为换电站功率 1, 在情况 1 的假设基础上, 将换电需求量增加 10%, 将其称之为情况 2, 图中标记为换电站功率 2。

由图 4 可见, 在时段 20, 换电站的负荷功率为  $-4$  MW 左右, 说明该时间段换电站向电网放电, 能够起到削峰填谷的作用。当换电站每日的需求量增加 10% 之后, 换电站低充高放的能力比情况 1 明显降低, 原本在时段 20 出现的负负荷几乎为零。

这种情况下, 虽然随着换电需求量的增大换电站运营收益增加了(2 万元), 但对电网而言, 其削峰填谷的作用却是减小的。

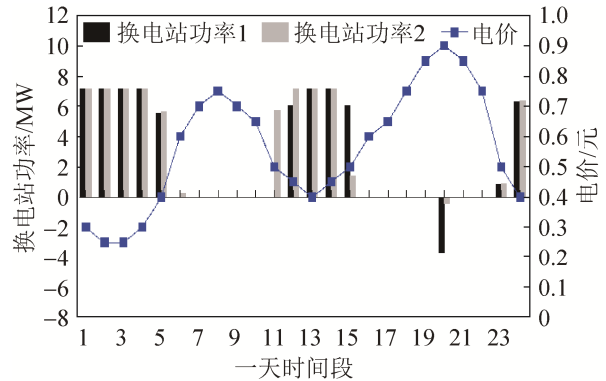


图4 换电站 24 h 功率(情况 1、2)

Fig. 4 EVBSS load power during 24h(case1、2)

文献[16]提到过此情况出现的原因, 通过增加总电池数和充电格位数可以解决此问题。本文通过以下分析验证以上结论。

在情况 2 的条件下, 增加 10% 的总电池数量和充电格位数量, 将其称为情况 3, 在图 5 中标记为换电站功率 1。同样在情况 2 的条件下, 将总电池数和充电格位数增加 20%, 将其称之为情况 4, 在图 5 中标记为换电站功率 2。

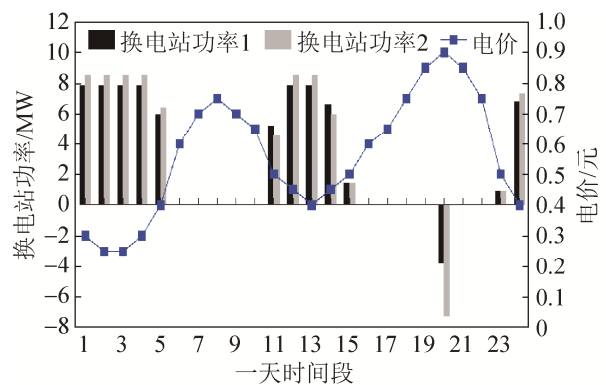


图5 换电站 24 h 功率(情况 3、4)

Fig. 5 EVBSS load power during 24h(case3、4)

由图 5 可见, 增加了电池数和充电格位数之后, 相较于情况 2, 此时换电站都出现了不同程度的负功率。由图中换电站功率 2 可见, 当增加 20% 的总电池数和充电格位数之后, 换电站在时段 20



的负功率明显增加, 削峰填谷能力增强。虽然电池和充电格位数对换电站收益的灵敏度较低, 但它们却是换电站削峰填谷能力的关键因素。

通过本文的灵敏度分析得出, 总电池数和充电格位数对换电站收益的影响比其他因素要小, 但却是削峰填谷的关键因素, 而购买电池与充电格位又将提升投资成本, 这样就存在着投资的回报率问题。在满足换电站一天各时段的换电需求量的情况下, 计算电池和充电格位数增加后所带来的经济效益。在情况 3 中, 此时换电站一天收益 2.17 万元, 与情况 2 相比较增加收益 0.121 9 万元, 折合成年收益为 44.49 万元, 增加的这部分投资为: 120 组电池(3.6 万元/组, 共 432 万元), 45 个充电格位(2 万元/个, 共 90 万元), 此时的总投资额为 522 万元。所做投资的年收益为 8.5%, 高于银行利率。

增加换电站的电池和充电格位数能够提高换电站收益, 但同时也会导致成本的增加。因此就需要确定在对换电站电池和充电格位投资时, 何时才能使投资收益率最大。当换电站总电池数目在 530 个以下或者充电格位数在 170 个以下时, 此线性模型不能得到最优解, 即此时的总电池数或充电格位数不能满足最低换电需求量。在情况 1 的条件下, 将换电站内电池数更改为 530 个, 称之为情况 5。然后逐步增加换电站内电池, 其他因素不变, 与情况 5 对比, 计算增加的那部分电池的投资成本、收益和收益率。数据如表 6 所示。

表 6 换电站投资成本及收益  
Tab. 6 EVBSS investment cost and benefits

增加的 电池/个	成本/ 万元	日收益/ 万元	年收益/ 万元	收益率/ %
120	432	0.27	99.13	22.95
240	864	0.49	179.52	20.78
360	1296	0.65	235.43	18.17
480	1728	0.74	269.14	15.58
600	2160	0.79	289.44	13.41
720	2592	0.84	307.04	11.85
870	3132	0.86	315.61	10

由表 6 可见, 当增加换电站内电池的投资, 换

电站的收益将增加, 但换电站的投资收益率将逐渐降低。收益率越低则意味着收回投资的时间越长。因此在进行换电站投资时需要综合考虑这个问题。以 10% 的最低投资回报率为例, 电池的最大投资数量为 870 个。

在情况 5 时, 对于换电站内电池的投资收益率接近于最大值, 并且满足最低换电需求量。将此情况作为换电站最大收益率点进行分析。此时电动汽车换电站的运行数据如表 7。

表 7 换电站 24 h 运行数据(情况 5)  
Tab. 7 EVBSS operation data in 24h(case5)

t/h	$M_t^{(1)}$	$M_t^{(2)}$	$W_t^{(1)}$	$J_t$	$K_t$	t/h	$M_t^{(1)}$	$M_t^{(2)}$	$W_t^{(1)}$	$J_t$	$K_t$
1	70	20	0	0	370	13	60	360	0	0	0
2	380	70	0	0	40	14	80	60	0	310	0
3	70	380	0	40	0	15	60	80	0	320	0
4	30	70	0	360	0	16	50	60	0	240	0
5	50	30	0	370	0	17	140	50	0	90	0
6	60	50	0	290	0	18	200	140	0	0	0
7	30	60	0	180	70	19	0	200	0	50	150
8	0	30	0	110	220	20	0	0	0	200	250
9	50	0	0	50	300	21	50	0	0	120	260
10	50	50	0	0	350	22	50	50	0	10	290
11	90	50	0	0	320	23	50	50	0	0	340
12	360	90	0	0	10	24	20	50	0	0	390

情况 5 时的换电站功率如图 6 所示。

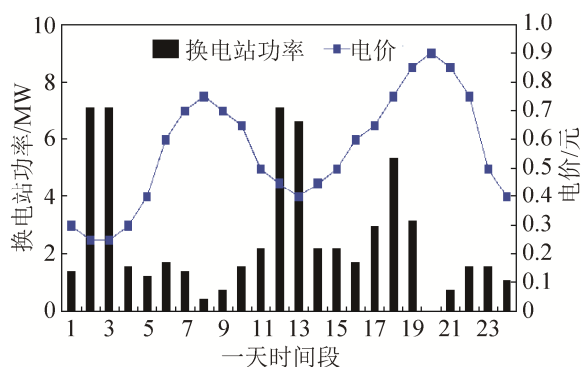


图 6 换电站 24 h 小时功率(情况 5)  
Fig. 6 EVBSS load power during 24h(case5)

由图 6 可见, 当换电站的投资收益率最大时, 换电站的负功率为零, 即此时的换电站不能起到削峰填谷的作用。通过增加电池能够加强换电站削峰

填谷的能力,但会使换电站的投资收益率降低。因此在做换电站投资的时候要兼顾投资收益率、换电需求量和换电站削峰填谷能力。

利用LINGO软件只需要迭代80次、计算时间在1s以内,就可以求解出本文模型中的最优解和最优值。适合于复杂情况的换电站充放电策略的研究。文献[17]建立的也是线性模型,其计算时间与本文中的模型的计算时间基本相同。但是文献[17]的模型只计算得出换电站的收益,没有分析充放电的管理。在几乎相同的计算时间内,本文的模型能够分析充放电策略,显然有更大优势。

## 4 结论

本文首先建立了电动汽车换电站运营效益的线性模型,然后对其各参数进行灵敏度分析,得出以下结论。

1) 各参数对换电站收益的灵敏度依次为:充换电服务费、电池折旧费、电价、充电格位数、总电池数。

2) 影响换电站削峰填谷能力的关键因素是换电站内的总电池数和充电格位数。

3) 在做换电站投资时要统筹兼顾投资收益率、换电需求量和削峰填谷能力这三方面因素。这些因素彼此制约。

## 参考文献:

- [1] Song Y H, Yang X, Lu Z X. Integration of plug-in hybrid and electric vehicles: experience from China[C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. Minneapolis, Minnesota, USA: IEEE Power & Energy Society, 2010: 1-6.
- [2] Boulanger A G, Chu A C, Maxx S. Vehicle electrification: status and issues[J]. Proceedings of the IEEE (S0018-9219), 2011, 99(6): 1116-1138.
- [3] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10.  
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and Utilization of Electric Vehicles Integration Into Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10.
- [4] 王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-10.  
WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Survey of Electric Vehicle Charging Load and Dispatch Control Strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 1-10.
- [5] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 36-42.  
LUO Zhuowei, HU Zechun, Song Yonghua, et al. Study on Plug-in Electric Vehicles Charging Load Calculating[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36-42.
- [6] 鲍冠南, 陆超, 袁志昌, 等. 基于动态规划的电池储能系统削峰填谷实时优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 11-16.  
Bao Guannan, LU Chao, YUAN Zhichang, et al. Load Shift Real time Optimization Strategy of Battery Energy Storage System Based on Dynamic Programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 11-16.
- [7] 孙晓明, 王玮, 苏粟, 等. 基于分时电价的电动汽车有序充电控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 191-195.  
SUN Xiaoming, WANG Wei, SU Su, et al. Coordinated Charging Strategy for Electric Vehicles Based on Time-of-use Price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 191-195.
- [8] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 127-131.  
GAO Ciwei, ZHANG Liang. A Survey of Influence of Electric Vehicle Charging on Power Grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.
- [9] 张昌华, 孟劲松, 曹永兴, 等. 换电模式下电动汽车换电充裕度模型及仿真研究[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 15-19.  
ZHANG Changhua, MENG Jinsong, CAO Yongxing, et al. A Battery Swapping Requirement Adequacy Model for Electric Vehicles and Its Simulation Research[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 15-19.
- [10] 张舒, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑电动汽车换电站与电网互动的机组组合问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 49-55.  
ZHANG Shu, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Research on Unit Commitment Considering Interaction Between Battery Swapping Station and Power Grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 49-55.
- [11] Adornato B, Patil R, Filipi Z. Characterizing naturalistic

- driving patterns for plug-in hybrid electric vehicle analysis[C]// IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Michigan: IEEE, 2009: 655-660.
- [12] Ashtari A, Bibeau E, Shahidinejad S. PEV charging profile prediction and analysis based on vehicle usage data[J]. IEEE Trans. on Smart Grid (S1949-3053), 2012, 3(1): 341-350.
- [13] Hubner M, Zhao L, Mirbach T, et al. Impact of large-scale electric vehicle application on the power supply[C]// Electrical Power & Energy Conference. Montreal: IEEE, 2009: 1-6.
- [14] 高赐威, 张亮, 薛飞, 等. 考虑集中型充电站定址分容的电网规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 40-46.  
GAO Ciwei, ZHANG Liang, XUE Fei, et al. Grid Planning Considering Capacity and Site of Large-scale Centralized Charging Stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 40-46.
- [15] 郭春林, 肖湘宁. 电动汽车充电基础设施规划方法与模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 70-75.  
GUO Chunlin, XIAO Xiangning. Planning Method and Model of Model of Electric Vehicle Charging Infrastructure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 70-75.
- [16] 孙伟卿, 王承民, 曾平良, 等. 基于线性优化的电动汽车换电站最优充放电策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 21-27.  
SUN Weiqing, WANG Chengmin, ZENG Pingliang, et al. An Optimal Charging/Discharging Strategy for Electric Vehicle Battery Swapping Stations Bsaed on Linear Optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 21-27.
- [17] 代倩, 段善旭, 蔡涛, 等. 电动汽车充换电站的成本效益模型及敏感性分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 41-46.  
DAI Qian, DUAN Shanxu, CAI Tao, et al. Cost-benefit Model and Its Sensitivity Analysis for Battery Charging and Swapping Station for Electric Vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 41-46.
- [18] Frederick S.Hillier, Gerald J Lieberman. 运筹学导论[M]. 第9版, 胡运权, 等译. 北京: 清华大学出版社, 2010: 85-272.  
Frederick S Hillier, Gerald J Lieberman. Introduction to operations research[M]. Ninth Edition, HU Yunquan, et al. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 85-272.
- [19] 王芳, 邱玉辉. 一种引入单纯形法算子的新粒子群算法[J]. 信息与控制, 2005, 34(5): 517-522.  
WANG Fang, QIU Yuhui. A Novel Particle Swarm Algorithm Using the Simplex Method Operator[J]. Information and control, 2005, 34(5): 517-522.
- [20] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 大规模电动汽车充放电优化控制及容量效益分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 19-26.  
LUO Zhuowei, HU Zechun, Song Yonghua, et al. Coordinated Charging and Discharging of Large-scale Plug-in Electric Vehicles with Cost and Capacity Benefit Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 19-26.
- [21] 段登伟, 刘俊勇, 吴集光. 计及风险的供电公司最优分时零售电价模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 8-12.  
DUAN Dengwei, LIU Junyong, WU Jiguang. Optimal TOU Retail Pricing Models for Distribution Utility with Risk Management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 8-12.