

# 基于电价响应的电动汽车充放电策略研究

万寿雄

(广西电网有限责任公司柳州供电局, 广西 柳州 545000)

**摘要:** 电动汽车用户参与电网互动是以获利为出发点,但影响用户经济收益的因素是多方面的,包括电池充放电成本、实时电价以及充放电策略等。从用户的角度出发,在实时电价下,构建了电动汽车充放电的成本模型和收益模型;运用 Matlab 进行求解,分析了电动汽车可盈利的充电时间段和放电时间段。计算结果表明,合理的充放电策略能为用户带来经济收益,且电动汽车的盈利充电时间段为电网负荷低谷期,放电时间段为负荷高峰期,这与电网削峰填谷策略要求一致。

**关键词:** 电动汽车; 配电网; 互动; 充放电策略; 经济效益

中图分类号: TM71 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)02-0090-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.02.021

## Research on Charging and Discharging Strategy of Electric Vehicle Based on Price Response

Wang Shouxiong

(Liuzhou Power Supply Bureau of Guangxi Power Grid Limited Liability Company, Liuzhou 545000, Guangxi, China)

**Abstract:** Electric vehicle users to participate in the interaction of the grid is based on the benefits, but there are many factors that influence the economic benefits of users, including battery charge and discharge cost, real-time electricity price and charging and discharging strategy etc. From the user's point of view, the cost and profit models for charging and discharging of electric vehicles are constructed under the real-time electricity price. And the profitable charging time and discharging time of electric vehicles has been analyzed using Matlab. Calculation results show that, the reasonable charging and discharging strategy can bring economic benefits to users, and the profitability of electric vehicle charging time is the trough of load, while the discharging time is the peak of load, which is consistent with the requirements of power grid peak clipping strategy.

**Key words:** electric vehicles; distribution network; interaction; charging and discharging strategy; economic benefit

## 0 引言

据统计,一辆电动汽车平均每天停车长达 23 h,且全年停驶时间占 96% 左右<sup>[1]</sup>。对于电动汽车用户,在满足基本行车需求的前提下,V2G 模式可以创造额外收入,也会加快车辆投资成本的摊销<sup>[2]</sup>。但是,由于实时电价和电池充放电损耗等因素,电动汽车用户在参与电网互动过程中,还会存在入不敷出的情况。比如当充电电价大于放电电价时,或者在电池放电成本过高,而峰谷电价差过低,以至于放电成本始终高于充电成本;而且不同型号的电池成本也不一样,电池损耗成本过高也会影响用户的收

益。另一方面,对配电网而言,大量电动汽车进行无序充电将加重配电网的负荷负担<sup>[3]</sup>,此外电动汽车充放电行为分散、单辆电动汽车的电池容量小,电网不可能直接对单辆电动汽车进行调控<sup>[4]</sup>。但是电动汽车参与电网互动的实质是参与电网削峰填谷,而电网的削峰填谷策略能实时响应电网负荷。因此,探索合理的调度策略和控制措施,充分考虑用户侧和电网侧需求,是解决大规模电动汽车参与配电网互动的关键<sup>[5]</sup>。

在电动汽车调度策略研究方面,文献[6-7]建立以电网损耗最小为目标的电动汽车充电优化模型,研究结果表明,合理控制电动汽车充电有利于降低电网损耗,提高电网综合经济效益。文献[8]以

包含充电成本、电网损耗成本等因素的充电总成本最小为目标,构建了电动汽车的优化控制模型。文献[9]基于分时电价和用户充电需求,以电动汽车充电总费用最低为目标制定调度计划。

电动汽车用户都希望在电价低的时段对电动汽车充电,而在电价高的时段向电网放电以获得电价差额利益,电动汽车用户的这一期望与电网削峰填谷策略一致<sup>[10]</sup>。通过采用相应的调度策略和控制措施,使电动汽车在电网负荷低谷时段进行充电,在负荷高峰时段进行放电,实现电网削峰填谷的作用,合理利用电动汽车作为储能单元的优势,给用户和电网带来收益<sup>[11]</sup>。鉴于此,从用户侧和电网侧需求出发,提出了基于价格响应的调度策略,并构建了相应的控制模型。

## 1 用户侧和配电网侧需求分析

电动汽车与配电网互动的过程就是双方博弈的过程。互动所产生的红利主要包括两方面:1)降低电网运营成本和投资成本,这主要是通过容量效益、调峰调频、丰富电网调节和控制手段、提供辅助服务等;2)在实时电价机制下,产生峰谷电价差额利润。

### 1.1 用户侧需求

用户侧需求主要包括以下几方面:1)电动汽车作为行驶工具,首先应该满足用户的基本行车需求;2)用户对电动汽车参与电网互动和退出互动具有优先权;3)在空闲时间段以储能单元参与电网互动,以期获得相应的额外收益;4)在参与电网互动的过程中避免电池的不经济放电(电池频繁充放电);5)其他便民服务,如充电向导、电价服务等。

### 1.2 配电网侧需求

配电网侧需求主要包括以下几方面:1)削峰填谷,转移电网高峰负荷,消纳电网低谷负荷;2)容量储备,容量越大越好;3)应急调度,应付紧急情况的调度需求;4)提高电网对清洁能源的消纳能力。

## 2 电动汽车参与电网互动的经济效益分析

### 2.1 电动汽车成本模型

电动汽车参与电网互动的总成本由电池损耗成本和购电成本组成。

$$C = C_b + C_c \quad (1)$$

式中: $C$ 为电动汽车参与电网互动的总成本; $C_b$ 为电池损耗成本; $C_c$ 为购电成本。

#### 1) 电池损耗成本

电池损耗与其充放电次数、放电深度、电池材料、温度等有关<sup>[12]</sup>,其折算方法根据文献[13]用电池的吞吐量来计算电池损耗。

电池单位电能吞吐损耗成本 $c_b$ 为

$$c_b = \frac{p_b \cdot E_{en}}{L_{c,max} \cdot E_{en} \cdot DOD} = \frac{p_b}{L_{c,max} \cdot DOD} \quad (2)$$

式中: $L_{c,max}$ 为电池最大充放电循环次数; $E_{en}$ 为电池的额定容量; $p_b$ 为电池单位容量价格成本,元/kWh;DOD为电池的最大放电深度。

电池放电损耗成本为

$$C_b = \int P_d(t) \cdot c_b dt \quad (3)$$

式中: $P_d(t)$ 为电池放电功率,kW/h。

#### 2) 购电成本

考虑电动汽车充放电过程中的能量损耗,购电成本为

$$C_c = \int P_{c,CD} \cdot \frac{p_c(t)}{\eta_c} dt \quad (4)$$

式中: $p_c(t)$ 为充电电价,元/kWh; $\eta_c$ 为电池充电效率; $P_{c,CD}$ 为充放电电能。

则电池的放电总成本 $p_{dz}(t)$ 为

$$p_{dz}(t) = \frac{p_c(t)}{\eta_c} + c_b \quad (\text{元/kWh}) \quad (5)$$

### 2.2 电动汽车收益模型

电动汽车参与电网互动的收益分为两部分:1)电动汽车向电网侧售电收益;2)向电网侧购电费用。

$$M = R_d - C \quad (6)$$

式中: $M$ 为电动汽车参与电网互动的收益; $R_d$ 为电动汽车售电收益; $C$ 为电动汽车购电费用。

#### 1) 电动汽车向电网侧售电收益

$$R_d = \int p_{en}(t) \cdot \eta_d \cdot P_d(t) dt \quad (7)$$

式中: $p_{en}(t)$ 为实时电价; $\eta_d$ 为电池放电效率。

2) 向电网侧放电成本包括电池损耗、充放电功率损耗以及购电费用。

$$C = \int P_d \cdot c_b dt + \int p_{dz}(t) \cdot P_c dt \quad (8)$$

将1天分为48个时间段,则电动汽车用户1天收益的计算模型为

$$M = \sum_{i=1}^{48} [p_{en}(i) \cdot \eta_d \cdot t_{d_i} \cdot P_d(i)] - \sum_{k=1}^{48} p_{dz}(t) \cdot t_{c_j} \cdot P_{c_j} \quad (9)$$

### 3 基于价格响应的调度策略

#### 3.1 目标函数

电动汽车价格响应调度策略就是在负荷高峰时,设定较高的交易电价,来引导电动汽车放电和减少电动车充电行为;在负荷低谷时,设定较低的交易电价,来引导电动汽车充电和减少电动车放电行为。电动汽车是否提供V2G服务将取决于市场电价。通过控制充放电功率,使电池在一个产生周期内(完成一次充放电循环),收益大于相应的可变成本。

以经济收益最大为目标函数

$$\max M = R_d - C \quad (10)$$

#### 3.2 约束条件

基于价格响应的调度策略以电价市场引导用户自主参与电网互动,电动汽车的充放电约束条件包括用户侧约束条件、实时电价市场、电池充放电能量和充放状态约束条件。

##### 1) 用户侧约束条件

电动汽车用户自主选择是否参与电网互动,设定当 $SL=1$ 表示参与电网互动, $SL=0$ 则不参与;电动汽车用户根据自身需求设定最小荷电量 $SOC_{min}$ 。

$$s. t. \begin{cases} SL = 1 \\ SOC_{min} \leq SOC(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中, $SOC(t)$ 为电池的实时荷电量。

##### 2) 电池能量约束条件

包括:①电池每次的充/放电能不能高于电池的可充/放电能量;②电池的实时荷电量不小于最小荷电量;③电池放电功率小于额定放电功率。

$$s. t. \begin{cases} \int P_{c,d}(t) dt < E_{en} \cdot [1 - SOC(t)] \\ \int P_d(t) dt < E_{en} \cdot [SOC(t) - SOC_{min}] \\ SOC(t) > SOC_{min} \\ P_d(t) < P_{d, \text{en}} \end{cases} \quad (12)$$

##### 3) 收益约束条件

用户的收益约束条件就是实时电价必须大于放电成本价。

$$s. t. p_{en}(t) \geq p_{dz}(t) \quad (13)$$

##### 4) 电池的状态约束条件

电池状态的约束条件包括:①电池的温度、电压不能越限;②电池的充放电循环次数不能超过最大循环次数。

$$s. t. \begin{cases} w_{min} < w(t) < w_{max} \\ v_{min} < v(t) < v_{max} \\ L_c(t) < L_{c, \text{max}} \end{cases} \quad (14)$$

式中 $v_{max}$ 、 $v_{min}$ 、 $w_{max}$ 、 $w_{min}$ 分别为电池电压上下限和温度上下限。

#### 3.3 电池充放电策略

##### 1) 电池放电策略

当市场电价大于放电成本时,放电功率为 $P_{d, \text{en}}$ ;市场电价小于放电成本时,放电功率为0。

$$P_d(t) = \begin{cases} P_{d, \text{en}}, p_{en}(t) \geq p_{dz}(t) \\ 0, p_{en}(t) < p_{dz}(t) \end{cases} \quad (15)$$

##### 2) 电池充电策略

电动汽车的充放电的决定因素包括:①用户的选择;②实时电价;③电池运行状态。

电动汽车充放电控制模型流程如图1所示。

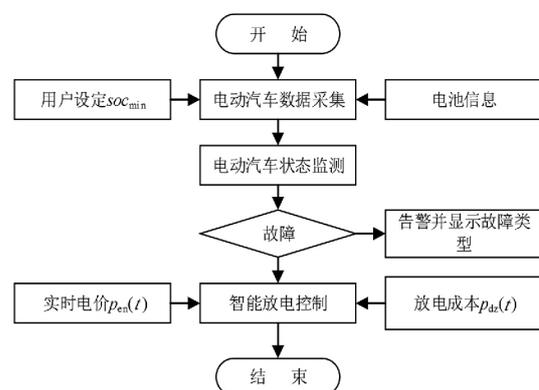


图1 EVs充放电流程

### 4 算例分析

将1天分48个时段电价,即电价的调整是建立在以30min为时间分辨率的序列,如图2所示。

以比亚迪e6<sup>[14]</sup>、荣威E50<sup>[15]</sup>、日产Leaf<sup>[16]</sup>、力帆620<sup>[17]</sup>4种电动汽车为例。取电池最大容量降低

到额定容量的70%时为电池寿命终止,则电池最大循环次数为10 000次。表1为4种品牌电动汽车的电池参数。

取电池的充电效率和放电效率都为0.92<sup>[7]</sup>,电池的电能容量服务价格 $p_{cap}$ 参照《并网发电厂辅助服务管理暂行办法》,取0.012元/(kWh·h)。由式(2)计算各品牌电动汽车电池的吞吐量成本。表2为4种品牌电动汽车电池的吞吐量成本。

表1 4种品牌EVs的电池参数

电动汽车品牌	e6	E50	Leaf	620
额定容量 $E_{en}/\text{kWh}$	57	18	24	30
最大续航 $l_{max}/\text{km}$	300	120	160	170
DOD/%	80	80	80	80

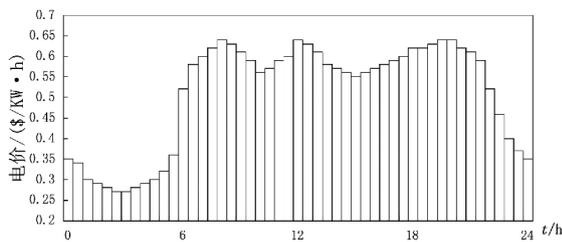


图2 实时电价

表2 4种品牌电动汽车电池的吞吐量成本

电动汽车品牌	e6	E50	Leaf	620
电池成本 $p_b/(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	2 500	3 000	3 500	3 000
吞吐量成本 $c_b/(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	0.312 5	0.375	0.437 5	0.375

提供的实时电价,以电池吞吐量成本最低的比亚迪e6和最高的日产Leaf为例,分析两种电动汽车在实时电价下的盈利情况。取电池的充电效率和放电效率都为0.92,最小续航值取20 km。

通过Matlab编程计算,得到比亚迪e6和日产Leaf在一天内各个时间段的放电电价和放电成本价,仿真结果如图3所示。

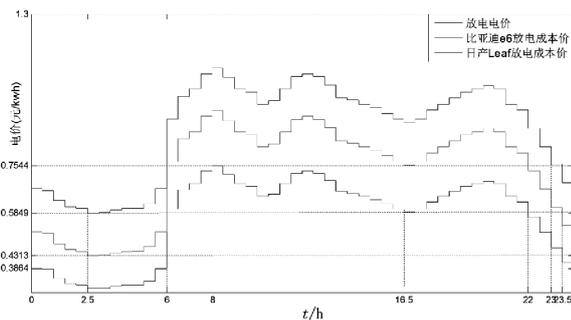


图3 e6和Leaf各个时间段的放电电价和放电成本价

由图3可得比亚迪e6和日产Leaf的可盈利充电和放电时间段,如表3所示。

表3 比亚迪e6和日产Leaf的可盈利充电和放电时间段

汽车品牌	可盈利的充电时间段	可盈利的放电时间段
比亚迪 e6	22:00 至次日 06:00	06:00 至 23:30
日产 Leaf	06:00 至 16:30、 17:00 至 22:00	23:00 至次日 06:00

由表3可以看出比亚迪e6的可盈利充电时间段和放电时间段出现了重叠部分,即在22:00至23:30时间段比亚迪e6既可以充电也可以放电。但事实上,比亚迪e6并不能在该时段进行先充电再放电。如果在该时段充电,那么只能到第2天才有可盈利的放电空间。因此,比亚迪e6一天只能进行一次充放电调度。

由图3和表3可以得出以下几个结论:

1) 由于日产Leaf的电池额定容量比比亚迪e6小,所以日产Leaf的可盈利空间小,且在相同条件下的盈利少;

2) 比亚迪e6和日产Leaf获得最大利润的情景相同,即在02:30至03:30进行充电,在08:00至08:30进行放电,相应的最大电价差分别为0.323 1(元/kWh)、0.169 5(元/kWh);

3) 比亚迪e6和日产Leaf在该实时电价下,一天只能进行一次可盈利的充放电调度。

此外,当用户选择的最小续航值变大时,或者充电效率变低时,电动汽车的盈利空间将进一步降低,甚至出现无法盈利的情况。

两辆电动汽车可盈利的充电时间段属于电网负荷低谷期,此时段电价低,且电网侧有增加负荷量的需求;放电的3个时间段都是用电高峰期,此时段电价高,且电网侧有转移高峰负荷的需求。因此,该充放电选择与电网削峰填谷的策略相符,与电网侧需求一致。

参考文献

[1] Saber A Y, Venayagamoorthy G K. Resource Scheduling under Uncertainty in a Smart Grid With Renewables and Plug-in Vehicles [J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(1): 103-109.  
[2] 孙波, 廖强强, 谢品杰, 等. 车电互联削峰填谷的经济成本效益分析[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 30-34.  
[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.

[4] 姚伟锋,赵俊华,文福拴,等.基于双层优化的电动汽车充放电调度策略[J].电力系统自动化,2012,36(11):30-37.

[5] Dominik Pelzer, David Ciechanowicz, H Aydt, et al. A Price-responsive Dispatching Strategy for Vehicle-to-Grid: An Economic Evaluation Applied to the Case of Singapore[J]. Journal of Power Sources, 2014, 256(3): 345-353.

[6] 占恺峤,宋永华,胡泽春,等.以降损为目标的电动汽车有序充电优化[J].中国电机工程学报,2012,32(31):11-18.

[7] 陈加盛,张建华,林建业,等.以降低电网损耗为目标的电动汽车充电策略[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(3):139-144.

[8] Sortomme E, Hindi M M, Macpherson S D J, et al. Coordinated Charging of Plug-in Hybrid Electric Vehicles to Minimize Distribution System Losses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 198-205.

[9] He Y, Venkatesh B, Guan L. Optimal Scheduling for Charging and Discharging of Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1095-1105.

[10] Sekyung H, Soohee H, Sezaki K. Development of an Optimal Vehicle-to-Grid Aggregator for Frequency Regulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 65-72.

[11] 陆凌蓉,文福拴,薛禹胜,等.电动汽车提供辅助服务的经济性分析[J].电力系统自动化,2013,37(14):43-49.

[12] Corey D. White, K. Max Zhang. Using Vehicle-to-Grid Technology for Frequency Regulation and Peak-load Reduction[J]. Journal of Power Sources, 2010, 196(8): 3972-3980.

[13] Sarre G, Blanchard P, Broussely M. Aging of Lithium-ion Batteries[J]. Journal of Power Sources, 2004, 127(127): 65-71.

[14] 比亚迪汽车官网. 比亚迪 e6 价格与配置[R/OL]. 2011-10-26. <http://www.bydauto.com.cn/car-param-e6.html>.

[15] 荣威汽车官网. 荣威 E50 价格与配置[R/OL]. 2012-11-05. <http://www.roewe.com.cn/rowee50/>.

[16] 百度百科. 日产 LEAF 参数配置[R/OL]. 2013-09-07. <http://baike.baidu.com/view/2706376.htm>.

[17] 上海中科电动汽车有限公司官网. 力帆 620 纯电动车[R/OL]. 2013-06-24. <http://www.zklf-ev.com/ShowProducts.asp>.

作者简介:

万寿雄(1991) 助理工程师,研究方向为配电网的经济运行和控制。

(收稿日期:2017-11-20)

(上接第45页)

[4] 金超,陆争荣,陈志华,等.配网低电压治理探讨[J].科技与企业,2016(9):236-237.

[5] 曹伟.利用无功补偿解决配电网低电压问题的对策研究[D].广州:华南理工大学,2016.

[6] 吴克胜,周瑜,盖大忠,等.青海配电网“低电压”治理探讨[J].青海电力,2015,34(4):4-7.

[7] 黄桂兰,林韩,蔡金锭.农村配电网低电压治理措施研究[J].电气技术,2015(11):64-67.

[8] 吕志来,沈春雷,徐杰彦,等.节能模式下的低电压治理方案比选研究[J].供用电,2015(11):43-47.

[9] 杨伟奇.低电压综合治理系统研究[D].兰州:甘肃农业大学,2015.

[10] 张成志.配电网低电压治理方法探讨[J].科技资讯,2015(8):111.

[11] 李岩.基于项目成本控制的农村低电压综合治理模式研究[D].福州:福州大学,2014.

[12] 韩英.浅谈“低电压”治理的多种技术措施[J].中国高新技术企业,2012(4):142-143.

[13] 潘少华.基于农村低电压现象的综合治理研究[J].中国电业(技术版),2011(11):63-65.

[14] Ming Tsung Tsai. Design of a Compact Series-connected AC Voltage Regulator with an Improved Control Algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(4): 933-936.

[15] Faiz J, Siahkolah B. New Solid-state on Load Tap-changers Topology for Distribution Transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 136-141.

作者简介:

姚晓(1974) 高级工程师,从事带电检测及配电网治理相关工作。

(收稿日期:2017-12-07)