

# 基于主从博弈的智能小区代理商定价策略及电动汽车充电管理

魏韡<sup>1</sup>, 陈玥<sup>1</sup>, 刘锋<sup>1</sup>, 梅生伟<sup>1</sup>, 田芳<sup>2</sup>, 张星<sup>2</sup>

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学 电机系), 北京市 海淀区 100084;

2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Stackelberg Game Based Retailer Pricing Scheme and EV Charging Management in Smart Residential Area

WEI Wei<sup>1</sup>, CHEN Yue<sup>1</sup>, LIU Feng<sup>1</sup>, MEI Shengwei<sup>1</sup>, TIAN Fang<sup>2</sup>, ZHANG Xing<sup>2</sup>

(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China;

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** The smart grid contains conventional loads and active loads. In China, the latter mainly consist of electric vehicles (EV). One important feature of active loads is that their demand will vary in response to the electricity price. With the popularization of EVs, the retailer will play an increasingly important role in residential EV charging management. How to determine the real-time electricity price and the energy purchase strategy in the wholesale market while accounting for the profit of the retailer and EV owners becomes an important topic. To this end, this paper formulates the optimal pricing and dispatch problem of smart grid retailers as a Stackelberg game, in which the upper level maximizes the retailer's benefit, while the lower level minimizes the charging cost of each EV. The proposed method also provides important reference for the research on demand response management. The Stackelberg game model is transformed into a mixed integer linear program by jointly using the Karush-Kuhn-Tucker (KKT) optimality condition as well as the duality theorem of linear programming. Finally the global optimal pricing strategy can be computed by using commercial solvers.

**KEY WORDS:** smart grid; electric vehicles charging; pricing; stackelberg game

**摘要:** 智能电网的负荷包括传统负荷和主动负荷, 我国配电网侧的主动负荷主要由电动汽车构成, 功率需求随电价变化是其重要特点之一。随着电动汽车的普及, 代理商将在小区电动汽车充电管理中扮演重要角色。如何制定代理商的定价与购电策略, 实现代理商与电动汽车车主双赢, 成为重要的

研究课题。基于以上原因, 提出了一种未来智能小区代理商的定价及购电策略, 将代理商和车主各自追求利益最大化建模为主从博弈。该模型亦可为研究电动汽车参与的需求侧响应提供重要的借鉴。另外, 还进一步通过 Karush-Kuhn-Tucker 最优性条件和线性规划对偶定理将此博弈模型转化为混合整数线性规划问题进行求解, 最终获得全局最优的定价策略。

**关键词:** 智能电网; 电动汽车充电; 定价; 主从博弈

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2015.04.010

## 0 引言

智能电网的重要特征之一是通过电价引导电能消费, 为终端用户提供更加廉价的自然资源, 并为系统调度人员提供更加灵活的能量管理手段<sup>[1-3]</sup>。大量电动汽车(electric vehicles, EV)是其负荷的重要组成部分。根据工业和信息化部电动汽车发展战略研究报告预测, 我国 2030 年电动汽车保有量可达 6 000 万辆<sup>[4]</sup>, 大量电动汽车的接入, 为提高电力市场能源利用率提供了更广阔的空间。

针对这个问题, 文献[5-7]研究了基于实时市场电价的电动汽车充电策略。文献[8]提出了电动有序模式和无序模式的放电模型, 并建立了峰谷电价时段优化模型。文献[9]分别讨论了联合调度模型和代理商调度模型下电动汽车充电计划对于日前市场电价的影响。此类方法考虑到电动汽车充电策略对于价格的反作用, 具有一定的合理性。

由于辖区内电动汽车数量可能相当庞大, 由调度机构统一管理每辆电动汽车是不现实的。比较可

基金项目: 国家自然科学基金委创新群体项目(51321005)。

Project Supported by the Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China(51321005).

行的方案是在住宅区建立代理商,对电动汽车实行分散管理。因此,代理商利益的优化是另一个重要的问题。类似的研究成果多见于针对充电站盈利的优化,如文献[10-12]。应当指出,充电站和小区代理商的充电模式有所不同。充电站的电动汽车到达时间具有较大随机性,对充电时间的要求较为苛刻,通常为15~30 min<sup>[13]</sup>;而小区代理商所管理的电动汽车的停留时间较为固定,允许的充电时间也较长。因此对小区内的电动汽车实行优化充电管理能够带来更大的效益。文献[14]引入了分层分区调度的理念,并发展了基于双层优化的电动汽车充放电调度模型,降低电动汽车无序充电对电力系统安全与经济运行带来的威胁。

本文研究代理商与电动汽车车主利益的优化问题,所提研究方法建模思路较已有成果有以下不同:首先,代理商无需直接干预电动汽车的充放电行为,只需制定各时段的电价引导其用户的消费行为。其次,用户不再完全是价格的“接受者”,他们可以自主选择充电时段。更重要的是,代理商与用户的竞争关系通过主从博弈(stackelberg game)描述,在该博弈的均衡处各方的利益均可达到最大。

## 1 代理商运营模式 and 定价问题描述

### 1.1 代理商与用户之间的信息传递机制

代理商作为电力系统和电动汽车使用者之间的中介,通过搜集电网电价及用户充电时间信息,制定充电电价,给小区中的电动汽车供电。本文采用文献[14]中的信息传递机制,包括日前申报、等值聚合和信息互动。此处与文献[14]略有不同。本文假定电动汽车通过智能终端(smart meter)接入小区电网,智能终端根据代理商提供的价格信息自动计算出最优充电策略并执行,无需代理商直接干预。

### 1.2 代理商运营模式

基于上述信息传递机制,代理商运营模式如下:

1) 车主向代理商上报电动汽车次日充电时段以及需求电量。代理商根据申报形成可用充电时段表,确定电量需求,完成等值聚合。

2) 代理商在日前市场签订购电合同,确定每个时段的购电量,并向用户发布次日各时段电价信息。此处规定代理商的零售电价不得高于实时市场电价。为进一步降低代理商的市场力,可限定零售电价均值的上界,以保证用户的利益。

3) 实时运行中智能终端自动控制电动汽车充电,并支付充电费用。代理商也可在实时市场出售

(购买)电能。

在上述框架下,代理商需要解决的关键问题是制定次日各时段电价。与传统优化问题不同,代理商的收入取决于电动汽车的充电策略,而电动汽车的充电并不直接由代理商控制,而是取决于代理商制定的电价。根据价格约定,日平均电价是固定的,若代理商抬高某时段的电价,则势必有其他时段的电价要低于平均值。而智能终端会自动选择电价低的时段充电。可见代理商和用户之间自然构成了主从博弈的关系。此外,在本文所研究的市场结构中,电网公司负责组织电力市场上的能量交易,并不直接参与零售市场的能量管理或从中盈利。电网公司的利益体现为:大量电动汽车的充电行为通过代理商的购电合同对电网表现为确定性的负荷需求,降低了随机充放电行为给电网调度造成的困难。

## 2 代理商定价的主从博弈模型

定价主从博弈的上层决策者是代理商,下层决策者是电动汽车车主。博弈结构如图1所示。

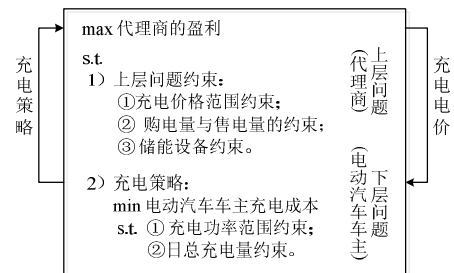


图1 主从博弈结构示意图

Fig. 1 Architecture for the stackelberg game

代理商的优化问题如下,决策变量是 $\{c_t, E_t, E_t^+,$

$E_t^-, r_t^+, r_t^-, z_t, u_t, \forall t\}$ :

$$\max \sum_t \sum_i c_t p_{it} + \sum_t (\pi_t^- E_t^- - \pi_t^d E_t - \pi_t^+ E_t^+) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } c_t^l \leq c_t \leq c_t^u, \forall t \quad (2)$$

$$\sum_{t=1}^T c_t / T = c_{av} \quad (3)$$

$$E_t \geq 0, 0 \leq E_t^+ \leq M z_t, \forall t \quad (4)$$

$$0 \leq E_t^- \leq r_t^-(1 - z_t), \forall t \quad (5)$$

$$\sum_i p_{it} + r_t^+ - r_t^- = E_t + E_t^+ - E_t^-, \forall t \quad (6)$$

$$0 \leq r_t^+ \leq u_t R_m^+, 0 \leq r_t^- \leq (1 - u_t) R_m^-, \forall t \quad (7)$$

$$\begin{cases} 0 \leq S_t = S_{t-1} + \eta^+ r_t^+ - r_t^- / \eta^- \leq S_{\max}, \forall t \\ S_1 = S_T = S_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $c_t$ 为 $t$ 时段的充电价格; $E_t$ 为日前市场 $t$ 时段的合同电量; $E_t^+$ 、 $E_t^-$ 为 $t$ 时段从实时市场的购入、售出电量; $r_t^+$ 、 $r_t^-$ 为 $t$ 时段储能设备的充、放电量; $z_t$ 是布尔变量,表示 $t$ 时段能量交易状态; $u_t$ 是布尔变量,表示 $t$ 时段储能装置状态; $p_{it}$ 为 $t$ 时段第 $i$

辆电动汽车的充电功率;  $\pi_t^+$ 、 $\pi_t^-$  为  $t$  时段实时市场购、售电电价;  $\pi_t^d$  为  $t$  时段日前市场合同电价;  $c_t^l$ 、 $c_t^u$  为  $t$  时段最低、最高电价;  $c_{av}$  为日平均电价;  $R_m^+$ 、 $R_m^-$  为储能设备的最大充电、放电功率;  $\eta^+$ 、 $\eta^-$  为储能设备的充、放电效率;  $S_{\max}$  为储能设备的最大容量;  $S_0$  为储能设备初始容量;  $T$  为总时段数;  $M$  是足够大的正常数, 可取为实时市场最大交易电量。

上述公式中, 目标函数式(1)极大化代理商的盈利。代理商的盈利由4部分组成, 其中第1项代表向用户售电的收入; 第2项为向实时市场售电的收入; 第3项为日前市场购电的成本; 第4项为实时市场购电的成本。

假设日前市场的电价低于实时市场的电价, 即  $\pi_t^d < \pi_t^+$ 。约束式(2)是定价的上下界, 式(3)是均价约束。约束式(4)—(6)共同构成功率平衡条件。其中式(4)(5)中整数变量  $z_t$  限制了  $E_t^+$  和  $E_t^-$  中至多只能有一个严格大于0。由于零售商向实时市场的售电量受储能设备容量限制, 有  $E_t^- \leq r_t^-$ , 考虑到  $E_t^+$  和  $E_t^-$  的互补关系, 有约束式(4)(5)。事实上, 受储能装置和电动汽车最大充电功率的影响,  $E_t^+$  必定小于所有用电设备最大充电功率之和, 因此, 式(4)中参数  $M$  亦可取为所有用电设备最大充电功率之和。应当指出, 通常情况下由于实时市场电价高于相同时段的日前市场电价, 在最优充电策略中代理商并不会从实时市场直接购电。然而现实中存在各种不确定性, 如某些电动汽车临时离开或需要临时充电服务等, 当充电策略以滚动优化方式实现时, 每个时段都会更新用户信息, 实时市场的购售电为零售商提供了应对多种不确定性的手段。约束式(7)限制了储能设备的充放电的速率, 整数变量  $u_t$  限制了  $r_t^+$  和  $r_t^-$  中至多有1个严格大于0, 即储能装置不能同时处于充电和放电状态。约束式(8)是储能设备的荷电状态方程, 且最后一个时段储能装置的荷电状态等于初始荷电状态, 使储能装置的荷电状态(state of charge, SOC)具有周期性。代理商优化问题中,  $\{p_{it}\}$  是电动汽车  $i$  在  $t$  时段的充电功率, 对应于电动汽车的最优充电策略。

博弈下层决策者电动汽车  $i$  的优化问题如下:

$$\{p_{it}\} = \operatorname{argmin}_t \sum_t c_t p_{it} \quad (9)$$

$$\text{s.t. } \sum_{t \in T_a} p_{it} = 0.9E_i^m - E_i^0 \quad (10)$$

$$0 \leq p_{it} \leq P_i^m, \forall t \in T_a \quad (11)$$

$$p_{it} = 0, \forall t \notin T_a, \forall i \quad (12)$$

式中:  $E_i^m$  为第  $i$  辆电动汽车的电池容量;  $E_i^0$  为第  $i$  辆电动汽车电池的初始电量;  $P_i^m$  为第  $i$  辆电动汽车

的最大充电功率;  $T_a$  为电动汽车充电时段。

上述公式中, 目标函数式(9)表示在代理商给出的电价下极小化自身充电成本。约束式(10)表明电动汽车的充电量应使电池达到相应的荷电水平。约束式(11)是对充电速度的限制。约束式(12)表明在不可用充电时段充电功率为0。

代理商问题式(1)—(8)和所有电动汽车问题式(9)—(12)构成了主从博弈。该博弈最初由 Stackelberg 在文献[15]中提出, 文献[16]研究了博弈为线性时的求解方法, 文献[17]将该方法推广至博弈为凸的情况。与文献[14]所提模型不同, 由于在电动汽车决策时电价已给定, 电动汽车问题是线性规划; 而问题式(1)—(8)中, 由于代理商需要考虑电动汽车对价格的反应, 因此  $\{c_t\}$  与  $\{p_{it}\}$  都是变量, 所以代理商与电动汽车构成的博弈问题既不是线性的也不是凸的。下文将基于 KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件和对偶理论将式(1)—(8)、(9)—(12)转化为混合整数线性规划, 从而可以采用商业软件求出全局最优解, 即博弈的均衡点。

### 3 求解方法

#### 3.1 主从博弈模型的等价非线性规划转化

对于博弈中电动汽车决策时, 价格是既定的, 若将线性规划式(9)—(12)用其 KKT 条件代替, 即可消去该优化问题, 得到变量  $\{p_{it}\}$  和价格  $\{c_t\}$  的约束关系。记对偶变量为  $\{\mu_i\}$ ,  $\{\eta_{it}^-, \eta_{it}^+\}$  和  $\{\sigma_{it}\}$ , 则线性规划式(9)—(12)的 KKT 条件为

$$c_t - \mu_i - \eta_{it}^+ - \eta_{it}^- - \sigma_{it} = 0, \forall i, \forall t \quad (13)$$

$$\sum_{t \in T_a} p_{it} = 0.9E_i^m - E_i^0, \forall i \quad (14)$$

$$0 \leq \eta_{it}^- \perp p_{it} \geq 0, \forall t \in T_a, \forall i \quad (15)$$

$$0 \geq \eta_{it}^+ \perp p_{it} - P_i^m \leq 0, \forall t \in T_a, \forall i \quad (16)$$

$$p_{it} = 0, \forall t \notin T_a, \forall i, \sigma_{it} = 0, \forall i, t \in T_a \quad (17)$$

式中:  $\mu_i$  为式(10)的对偶变量;  $\eta_{it}^-$ ,  $\eta_{it}^+$  为式(11)的对偶变量;  $\sigma_{it}$  为式(12)的对偶变量。

约束式(15)与(16)是互补松弛条件, 其中  $x \perp y$  表示标量  $x$  与  $y$  中至多有一个可以严格大于0。式(13)—(17)可将下层优化转化为约束。至此, 目标函数式(1)和互补松弛条件式(15)(16)是非线性的。以下讨论如何将该非线性问题线性化。

#### 3.2 互补松弛条件的线性化

采用文献[18]中的方法, 通过引入布尔变量  $\theta_{it}^-$  和  $\theta_{it}^+$  将约束式(15)(16)转化为以下线性不等式:

$$0 \leq \eta_{it}^- \leq M\theta_{it}^-, \forall t \in T_a, \forall i \quad (18)$$

$$0 \leq p_{it} \leq M(1 - \theta_{it}^-), \forall t \in T_a, \forall i \quad (19)$$



$$0 \leq P_i^m - p_{it} \leq M\theta_{it}^+, \forall t \in T_a, \forall i \quad (20)$$

$$M(\theta_{it}^+ - 1) \leq \eta_{it}^+ \leq 0, \forall t \in T_a, \forall i \quad (21)$$

式中:  $\theta_{it}^-$ 、 $\theta_{it}^+$  为布尔变量;  $M$  是一个充分大的正数。

由约束式(18)可知, 若  $\eta_{it}^- > 0$ , 则  $\theta_{it}^- = 1$ , 由式(19)可知  $p_{it} = 0$ 。反之若  $p_{it} > 0$ , 则  $\eta_{it}^- = 0$ 。对式(20)(21)有类似的性质。可见式(18)—(21)与互补松弛条件式(15)(16)等价。

### 3.3 目标函数的线性化

目标函数的非线性源于电价和充电功率的乘积  $c_t p_{it}$ 。线性规划的对偶定理表明, 在最优解处原问题和对偶问题的目标函数值相等。对于线性规划式(9)—(12), 可得如下等式

$$\sum_i c_i p_{it} = \mu_i (0.9E_i^m - E_i^0) + \sum_t \eta_{it}^+ P_i^m \quad (22)$$

在 KKT 条件约束下, 目标函数式(1)等价于

$$\sum_i \mu_i (0.9E_i^m - E_i^0) + \sum_i \sum_t \eta_{it}^+ P_i^m + \sum_t (\pi_t^- E_t^- - \pi_t^d E_t - \pi_t^+ E_t^+) \quad (23)$$

式(23)关于决策变量是线性的。

### 3.4 主从博弈模型的等价混合整数线性规划模型

综上所述, 代理商定价博弈可转化为如下混合整数线性规划:

$$\max \sum_i \mu_i (0.9E_i^m - E_i^0) + \sum_i \sum_t \eta_{it}^+ P_i^m + \sum_t (\pi_t^- E_t^- - \pi_t^d E_t - \pi_t^+ E_t^+) \quad (24)$$

s.t. 式(2)—(8), 式(13)(14), 式(17)—(21)

混合整数线性规划式(24)最优解中  $\{c_t, E_t, E_t^+, E_t^-, r_t^+, r_t^-, z_t, u_t, p_{it}, \forall i, t\}$  构成了博弈式(1)—(8)、(9)—(12)的 Stackelberg 均衡。

## 4 算例分析

本节通过算例说明前文所提模型和求解方法的有效性。同时分析不同类型电动汽车比例、储能设备的容量  $S_{\max}$  和定价下限  $c_{\min}$  等因素对代理商盈利和电动汽车车主充电成本的影响。

### 4.1 系统配置

为了便于显示计算结果, 本例假设等值聚合后电动汽车可分为 3 组, 每组分别有  $N=[50, 20, 10]$  辆电动汽车。每组电动汽车可充电时间如表 1 所示(1 表示可充电, 0 表示不可充电)。第 1 组代表“早出晚归型”; 第 2 组代表“正常作息型”; 第 3 组代表“夜班型”。等值聚合后的电动汽车参数见表 2。此处暂设“早出晚归型”占主导。

日前市场电价见表 3。实时市场的购电价格一

般高于日前市场的购电价格, 本例中假设  $\pi_t^+ = \pi_t^- = 1.2\pi_t^d$ 。零售电价的上限  $c_t^u = \pi_t^+$ , 下限  $c_t^l = 0.8\pi_t^d$ , 均值  $c_{av} = 0.5$  元/(kW·h)。储能设备的参数见表 4。

表 1 电动汽车可充电时段  
Tab. 1 Time period available for charging

时段	第 1 组	第 2 组	第 3 组	时段	第 1 组	第 2 组	第 3 组
1	1	1	0	13	0	1	1
2	1	1	0	14	0	1	1
3	1	1	0	15	0	1	1
4	1	1	0	16	0	0	1
5	1	1	0	17	0	0	1
6	1	1	0	18	0	0	1
7	0	1	0	19	0	0	1
8	0	1	1	20	0	1	1
9	0	0	1	21	0	1	0
10	0	0	1	22	1	1	0
11	0	0	1	23	1	1	0
12	0	0	1	24	1	1	0

表 2 电动汽车参数

Tab. 2 Parameters of EVs

参数	第 1 组	第 2 组	第 3 组
$E_i^m$ /(kW·h)	24	24	24
$E_i^0$ /(kW·h)	9.6	9.6	9.6
$P_i^m$ /kW	3	3	3

表 3 日前市场电价

Tab. 3 Price of day-ahead market

时段	电价/元	时段	电价/元	时段	电价/元
1	0.35	9	0.52	17	0.81
2	0.33	10	0.58	18	0.75
3	0.30	11	0.66	19	0.64
4	0.33	12	0.75	20	0.55
5	0.36	13	0.81	21	0.53
6	0.40	14	0.76	22	0.47
7	0.44	15	0.80	23	0.40
8	0.46	16	0.83	24	0.37

表 4 储能设备参数

Tab. 4 Parameters of energy storage device

$R_w$ /kW	$R_c$ /kW	$S_{\max}$ /(kW·h)	$S_0$ /(kW·h)	$\eta^+$	$\eta^-$
1 000	1 000	5 000	2 500	0.9	0.9

### 4.2 标称系统最优解

采用 4.1 节数据, 求解混合整数线性规划式(24), 得到代理商的最大收益为 2 388.84 元, 代理商的最优策略见表 5。电动汽车的充电策略见表 6。

由于第 1 组电动汽车的数量和容量明显多于另外 2 组, 由表 5 可见, 代理商总是在第 1 组电动汽车的可用/不可用充电时段将电价设置到上限/下限以满足均价。由于实时市场购电价格高于日前市场, 所以理论上不需要从实时市场购电, 此设定是为了在应用时应对电动汽车临时离开等不确定因素。另一方面, 表 6 所对应的策略使每台电动汽车的充电成本最低, 因此理性的车主没有偏离该策略的倾向。因此在表 5 所示电价下, 电动汽车的充电成为有序行为。

表5 代理商最优定价策略  
Tab. 5 Retail's optimal pricing strategy

时段	充电价格/ (元/(kW·h))	日前市场 购电量/ (kW·h)	实时市场 购电量/ (kW·h)	实时市场 售电量/ (kW·h)	储能设备 储电量/ (kW·h)
1	0.42	210	0	180	2 300
2	0.40	1 210	0	0	3 200
3	0.36	1 210	0	0	4 100
4	0.40	1 210	0	0	5 000
5	0.42	0	0	0	5 000
6	0.42	0	0	0	5 000
7	0.42	0	0	0	5 000
8	0.51	30	0	0	5 000
9	0.51	30	0	0	5 000
10	0.51	30	0	0	5 000
11	0.53	0	0	0	5 000
12	0.60	0	0	0	5 000
13	0.65	0	0	1 000	3 889
14	0.61	0	0	500	3 333
15	0.64	0	0	1 000	2 222
16	0.66	0	0	1 000	1 111
17	0.65	0	0	1 000	0
18	0.60	0	0	0	0
19	0.51	0	0	0	0
20	0.51	30	0	0	0
21	0.42	0	0	0	0
22	0.42	777.78	0	0	700
23	0.42	1 000	0	0	1 600
24	0.42	1 000	0	0	2 500

表6 电动汽车最优充电策略  
Tab. 6 EVs' optimal charging strategies

时 段	第1组/ (kW·h)	第2组/ (kW·h)	第3组/ (kW·h)	时 段	第1组/ (kW·h)	第2组/ (kW·h)	第3组/ (kW·h)
1	3	3	0	13	0	0	0
2	3	3	0	14	0	0	0
3	3	3	0	15	0	0	0
4	3	3	0	16	0	0	0
5	0	0	0	17	0	0	0
6	0	0	0	18	0	0	0
7	0	0	0	19	0	0	0
8	0	0	3	20	0	0	3
9	0	0	3	21	0	0	0
10	0	0	3	22	0	0	0
11	0	0	0	23	0	0	0
12	0	0	0	24	0	0	0

4.3 电动汽车比例对最优解的影响

在保证3组电动汽车总量一定的前提下,改变各组电动汽车所占的比例,取 $N=[20,10,50]$ 辆及 $N=[20,30,30]$ 辆。所得结果见图2。可见,在不同的电动汽车比例下,最优价格并不相同,主要受各充电类型电动汽车所占比例的影响。当“早出晚归型”主导时,由于夜间的充电需求大,所以夜间定价也会相对高;当“夜班型”主导时,情况相反。

仍采用表5中的充电电价不变,分别考虑不同类型电动汽车比例的情况,得到的代理商盈利与优化结果对比如图3所示。

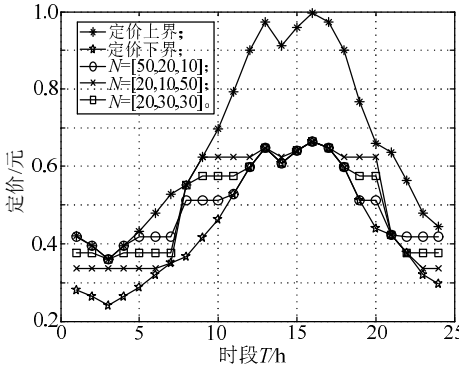


图2 实时电价及其上下限  
Fig. 2 Real-time price sequence and upper/lower bounds under different N

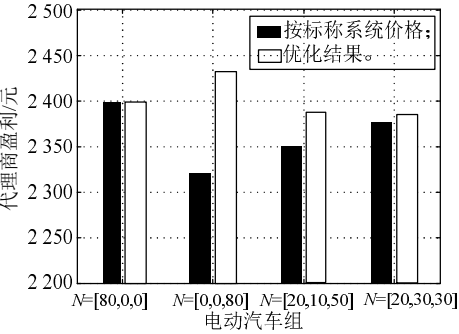


图3 不同需求和定价下代理商利润对比  
Fig. 3 Comparison of retail's profit under different N and corresponding real-time price

可见,采用本文的方法,代理商的盈利更大。同时可以得到以下信息:1)电动汽车类型集中时(如 $N=[80,0,0]$ 、 $N=[0,0,80]$ ),代理商的盈利最高,随着3种类型数量分配趋向均匀,代理商盈利逐渐降低。这是因为单一类型主导时,代理商将该类型可充电/不可充电时段价格设置到最高/最低且满足均值即可获得最大盈利;而当3种类型比例接近时,由于有均值的限制,代理商各个时段充电价格均不能设置得太高,这样将使其总盈利减小。2)“夜班型”主导时代理商的盈利大于“早出晚归型”或者“正常作息型”主导时的盈利。这是因为“夜班型”的可充电时间在日间,而日间的实时市场电价高于夜间,因此定价上限也高于夜间,所以代理商可以将价格定得更高以获得更多的利润。

由图4可见,车主从代理商购电的成本低于直接从实时市场购电的成本,这有利于代理商管理方式的推行。同时,当“夜班型”主导时,车主充电成本明显上升。这是因为,“夜班型”的可充电时段在日间,代理商能将充电价格定得更高以取得更大的盈利,这也就使得电动汽车车主的充电成本上升。但是,由于充电成本仍低于直接从实时市场购电的成本,所以从这一角度看,车主仍是获益的。

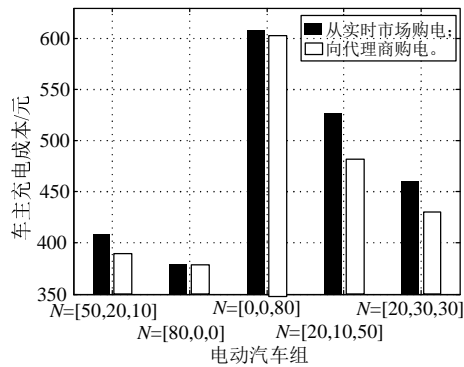


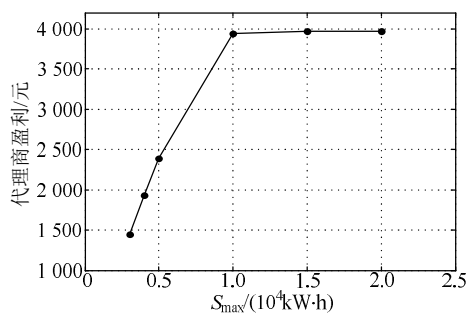
图4 不同需求和定价下车主充电成本对比

Fig. 4 Comparison of consumers' cost under different  $N$  and corresponding real-time price

上述结果说明, 根据本文所提方法确定的代理商的电价与用户的需求有关。这种定价方法较采用不变的电价具有更好的灵活性。

#### 4.4 储能设备容量对最优解的影响

设  $S_{\max}$  从 3 000 kW·h 到 20 000 kW·h 变化, 其余参数同标称系统。代理商盈利的变化如图 5 所示。

图5 不同  $S_{\max}$  下代理商利润对比Fig. 5 Comparison of retail's profit under different  $S_{\max}$ 

由图 5 可见, 随着储能设备最大容量  $S_{\max}$  的增加, 代理商的盈利先增加后不变。这是因为储电设备的容量增大, 使得代理商可以在日前市场低价时段以较低的价格购买更多电量进行储存, 一来减小了在高电价时段的购电量, 节约了购电成本, 二来可以在实时市场电价高时向配电网出售电能, 从而提高自身利润。而在  $S_{\max}$  增大到一定程度时, 受储能设备充放电速率的限制, 更多容量未能利用, 所以代理商的利润达到饱和。

#### 4.5 定价下限对最优解的影响

在保证电动汽车的比例 ( $N=[50,20,10]$ ) 及其他参数均不变的前提下, 改变定价下限, 从 0.5 倍日前市场合约电价到 0.9 倍日前市场电价变化, 所得代理商盈利及电动汽车车主充电成本变化如图 6、图 7 所示。

由图 6、7 可见, 随着定价下限的提高, 代理商的盈利及电动汽车车主充电成本逐渐下降。这是因为随着定价下限的提高, 使得不可充电时段或者少电动汽车充电时段的定价提高, 由于有定价均

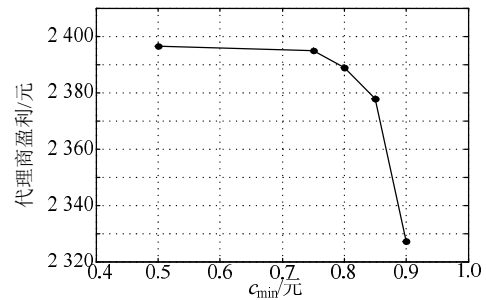


图6 不同定价下限代理商利润对比

Fig. 6 Comparison of retail's profit under different floor price

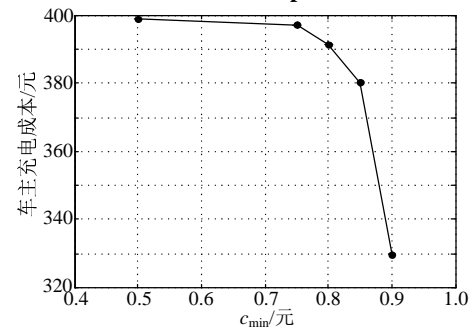


图7 不同定价下限车主充电成本对比

Fig. 7 Comparison of consumers' cost under different floor price

值的限制, 导致多电动汽车充电时段的定价下降, 代理商的盈利下降, 车主充电成本下降。因此, 为了保障代理商的利益同时不损害车主的利益, 定价下限不能太高也不能太低, 应综合考虑选取适当值。

## 5 结论

1) 本文提出了代理商定价问题的主从博弈模型, 考虑了电动汽车充电策略对价格的响应, 能够减小用户成本, 实现代理商和车主的双赢。

2) 为了求出最优定价策略, 本文提出通过 KKT 条件和线性规划的对偶定理将博弈模型转化为混合整数线性规划, 无需任何近似。

3) 算例验证了本文所提方法的有效性。计算结果表明, 电动汽车充电电价应随需求变化可提高代理商的收益。在一定范围内增加储能设备的容量是代理商提高收益的另一条有效途径。

## 致谢

本文的研究工作获得了“中国电力科学研究院院士团队合作项目(XTB51201303968)”的资助, 谨此致谢!

## 参考文献

- [1] 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(in Chinese).
- [2] 张文亮, 刘壮志, 王明俊, 等. 智能电网的研究进展及发展趋势[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 1-11.  
Zhang Wenliang, Liu Zhuangzhi, Wang Mingjun, et al. Research status and development trend of smart grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 1-11(in Chinese).
- [3] 刘壮志, 许柏婷, 牛东晓. 智能电网需求响应与均衡分析发展趋势[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1555-1561.  
Liu Zhuangzhi, Xu Baiting, Niu Dongxiao. Development tendency of equilibrium analysis and demand response for smart grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1555-1561(in Chinese).
- [4] 葛少云, 黄镠, 刘洪. 电动汽车有序充电的峰谷电价时段优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 1-5.  
Ge Shaoyun, Huang Liu, Liu Hong. Optimization of peak-valley TOU power price time-period in ordered charging mode of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 1-5(in Chinese).
- [5] Pantos M. Exploitation of electric-drive vehicles in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 682-694.
- [6] Rotering N, Ilic M. Optimal charge control of plug-in hybrid electric vehicles in deregulated electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1021-1029.
- [7] Rajaraman R, Sarlashkar J V, Alvarado F L. The effect of demand elasticity on security prices for the PoolCo and multi-lateral contract models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(3): 1177-1184.
- [8] 葛少云, 王龙, 刘洪, 等. 计及电动汽车入网的峰谷电价时段优化模型研究[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2316-2321.  
Ge Shaoyun, Wang Long, Liu Hong, et al. An optimization model of peak-valley price time-interval considering vehicle-to-grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2316-2321(in Chinese).
- [9] Balram P, Le Anh T, Bertling Tjernberg L. Effects of plug-in electric vehicle charge scheduling on the day-ahead electricity market price[C]//2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies(ISGT Europe). Berlin: IEEE, 2012: 1-8.
- [10] 张良, 严正, 冯冬涵, 等. 采用两阶段优化模型的电动汽车充电站内有序充电策略[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 967-973.  
Zhang Liang, Yan Zheng, Feng Donghan, et al. Two-stage optimization model based coordinated charging for EV charging station[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 967-973(in Chinese).
- [11] 徐智威, 胡泽春, 宋永华, 等. 充电站内电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 38-43.  
Xu Zhiwei, Hu Zechun, Song Yonghua, et al. Coordinated charging of plug-in electric vehicles in charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 38-43(in Chinese).
- [12] Sortomme E, El-Sharkawi M A. Optimal charging strategies for unidirectional vehicle-to-grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 131-138.
- [13] 杨亚北. 电动车快速充电站的设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [14] 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.  
Yao Weifeng, Zhao Junhua, Wen Fushuan, et al. A charging and discharging dispatching strategy for electric vehicles based on bilevel optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 30-37(in Chinese).
- [15] Von Stackelberg H. Marktform und gleichgewicht[M]. Vienna: Springer, 1934: 227-230.
- [16] Anandalingam G, White D J. A solution method for the linear static Stackelberg problem using penalty functions[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1990, 35(10): 1170-1173.
- [17] Shimizu K, Lu M. A global optimization method for the Stackelberg problem with convex functions via problem transformation and concave programming[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1995, 25(12): 1635-1640.
- [18] Fortuny-Amat J, McCarl B. A representation and economic interpretation of a two-level programming problem[J]. Journal of the operational Research Society, 1981, 32(9): 783-792.



魏韡

收稿日期: 2014-11-03。

作者简介:

魏韡(1985), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为鲁棒优化、双层优化及博弈论在电力系统规划与调度中的应用, E-mail: wei-wei04@mails.tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 王金芝)