

· 自动化技术 ·

面向电动汽车无线充电市场的迭代双边拍卖算法

周文辉^{1,2}, 钟伟锋¹, 吴杰², 邹生¹

(1. 广东工业大学自动化学院, 广东省物联网信息技术重点实验室 广州 510006; 2. 电子科技大学中山学院 广东 中山 528402)

【摘要】在智能电网中, 分布式能源具有灵活性, 可以支持来自电动汽车的快速变化的无线充电需求。针对无线充电市场采用迭代双边拍卖算法进行电能供需匹配, 分布式能源作为电能卖方, 汇集商汇集电动汽车的充电需求, 作为电能买方, 买卖双方按照自身效益最大化的原则进行出价。代理商作为拍卖师, 根据出价进行电能分配和定价, 可以在买卖双方隐私信息未知的情况下最大化总效益。仿真结果表明, 该算法可以最大化供需双方的总效益, 且具有较快的收敛速度, 能够保证电动汽车与分布式能源之间电能分配的高效性。

关键词 电动汽车; 迭代双边拍卖; 智能电网; 无线充电

中图分类号 TP273 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2017.06.012

Iterative Double Auction Algorithm for Wireless Electric Vehicle Charging Market

ZHOU Wen-hui^{1,2}, ZHONG Wei-feng¹, WU Jie², and ZOU sheng¹

(1. School of Automation, Guangdong University of Technology, and Guangdong Key Laboratory of IoT Information Technology Guangzhou 510006;

2. Zhongshan Institute, University of Electronic Science and Technology of China Zhongshan Guangdong 528402)

Abstract In smart grid, distributed energy resources are flexible and able to support the fast-changing wireless charging demand from electric vehicles. An iterative double auction algorithm is employed to match power supply and demand for the wireless charging market, in which distributed energy resources act as power sellers, and aggregators that aggregate charging demands of electric vehicles act as power buyers. Buyers and sellers offer prices based on the principle of self-utility maximization. An agent, as an auctioneer, determines power allocation and payment according to the offered prices, and it can maximize the total utility while the private information of buyers and sellers is unknown. Simulation results show that the algorithm can maximize the total benefit of supply and demand at a fast convergence speed, ensuring the efficiency of power allocation between electric vehicles and distributed energy resources.

Key words electric vehicle; iterative double auction; smart grid; wireless charging

近年, 电动汽车的销量节节攀升, 与电动汽车配套的充电设施也得到大范围铺设。未来, 无线电力传输技术将应用到电动汽车充电中, 使充电更加便捷、安全^[1]。无线充电系统分为两个子系统: 电能发送系统和电能接收系统。前者可安装在马路、停车位的地下, 后者安装在车底下。两个系统通过电磁感应进行电力传输, 无需人工电缆连接。

2013年, OLEV(online electric vehicle)公交系统在韩国龟尾市内投入运营, 该公交系统采用动态无线充电方式, 公交车可以一边行驶一边充电^[2-3]。文献[4]设计出面向动态无线充电的信息通信系统, 路测控制单元与电动汽车进行实时通信, 并根据车的

航线对电能发送系统进行开关控制。文献[5]研究了电动汽车无线充电负荷对电力市场的影响, 但它只考虑日前市场(即提前一天对负荷进行预测并安排电力生产), 而且认为预测是完美的, 故忽略了电动汽车驾驶行为的随机性。

由于电动汽车的驾驶速度快、航线(包括时间和地点信息)不确定, 所以其无线充电负荷也是快速变化、不确定的。远距离的大型集中式发电的响应速度较慢, 难以满足无线充电的需求。本地的分布式能源响应速度较快、灵活性较高^[6], 适合作为无线充电负荷的电力供给。可见, 电动汽车无线充电市场需要一种高效的多对多电能交易机制来匹配分布

收稿日期: 2016-09-12; 修回日期: 2016-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(61422201, 61370159, U1201253); 广东省优秀青年教师培养计划(YQ2013057)

作者简介: 周文辉(1972-), 男, 博士, 教授, 主要从事智能电网等方面的研究。

式能源的供给和电动汽车的需求。

本文针对智能电网中电动汽车无线充电市场,采用迭代双边拍卖算法进行电能供需匹配。分布式能源作为电能卖方,汇集商(agggregator)汇集电动汽车的充电需求,作为电能买方。所有买方和卖方都是非合作关系,独立地进行出价。代理商作为拍卖师,根据出价进行电能分配和定价,无需买卖方的隐私信息。仿真结果表明,本文算法可以最大化供需双方的总效益,且具有较快的收敛速度,能够保证电动汽车与分布式能源之间电能分配的高效性。

1 系统模型

1.1 电动汽车无线充电市场

图1给出智能电网中电动汽车无线充电市场的示意图。汇集商管理一片区域内的无线充电设施,能够实时获取到区域内电动汽车的航线和充电需求信息^[4],并在市场中购买电能来满足车的充电需求。分布式能源可以是可再生能源,也可以是火力发电,作为电能卖方。代理商作为拍卖师,跟买卖双方交换信息,达到优化双方总效益的目的。考虑到电动汽车的快速移动性和航线的不确定性,该无线充电市场应该对电能进行预售,事先确定电能交易量和价格。如现在是5:55,市场对6:00–6:05时段进行电能预售(PJM电力市场中实时电能调度时间间隔是5 min^[7])。电动汽车需要保证在该时段内始终与充电设施(动态或静态)连接,汇集商才会接受它的充电请求。不能保证这一点其他电动汽车将不能参与此次电能预售,它们可以通过其他方式(如主电网)获得电能。

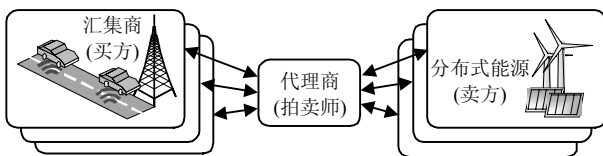


图1 智能电网中电动汽车无线充电市场

1.2 问题描述

对某一个时段进行分析。用 $i \in [A]$ 标记汇集商,其中集合 $[A]$ 定义为 $[A] \triangleq \{1, 2, \dots, A\}$, 表示汇集商的集合。用 $[V_i] \triangleq \{1, 2, \dots, V_i\}$ 表示汇集商 i 中允许充电的电动汽车的集合。用 d_{ik}^{\min} 和 d_{ik}^{\max} 分别表示电动汽车 $k \in [V_i]$ 的充电需求的最小值和最大值。汇集商 i 必须满足 $\geq d_{ik}^{\min}$, 否则电动汽车将有可能由于电力不足而无法行驶。 d_{ik}^{\max} 由每辆车的最大充电功率决定。用 $j \in [G]$ 标记分布式能源, $[G] \triangleq \{1, 2, \dots, G\}$ 表示分

布式能源的集合。用 d_{ij} 表示汇集商 i 对能源 j 的电能需求量,故汇集商 i 的需求向量表示为 $\mathbf{d}_i \triangleq \{d_{ij} | j \in [G]\}$, 所有汇集商的需求表示为 $\mathbf{d} \triangleq \{\mathbf{d}_i | i \in [A]\}$ 。汇集商 i 中电动汽车的满意度函数表示为:

$$U_i(\mathbf{d}_i) = r_i \ln \left(\xi \sum_{j=1}^G d_{ij} - \sum_{k=1}^{V_i} d_{ik}^{\min} + 1 \right) \quad (1)$$

式中, r_i 为常数; ξ 为电动汽车无线充电效率。由式(1)可知,只有当汇集商 i 所提供的充电电量大于电动汽车最小需求量时,满意度才能得到提升。

用 s_{ij} 表示分布式能源 j 对汇集商 i 的电能供应量,故能源 j 的供应向量表示为 $\mathbf{s}_j \triangleq \{s_{ij} | i \in [A]\}$, 所有能源的供应表示为 $\mathbf{s} \triangleq \{\mathbf{s}_j | j \in [G]\}$ 。分布式能源 j 的成本函数^[4]表示为:

$$C_j(\mathbf{s}_j) = c_{1,j} \left(\sum_{i=1}^A s_{ij} \right)^2 + c_{2,j} \sum_{i=1}^A s_{ij} + c_{3,j} \quad (2)$$

式中, $c_{1,j}$ 、 $c_{2,j}$ 、 $c_{3,j}$ 为常数,且 $c_{1,j} > 0$ 。

汇集商和分布式能源之间是非合作的关系,且它们的目标往往是矛盾的。汇集商希望获得更多电能来提升电动汽车的满意度,而分布式能源却希望尽量减少发电成本。因此,它们需要一个代理商来协调电能分配。这里考虑代理商需要最大化双方的总效益,即社会福利(social welfare, SW)。通过求解下面的SW问题,可以得到最优的 \mathbf{d}^* 和 \mathbf{s}^* :

$$\text{SW: } \max_{\mathbf{d}, \mathbf{s}} \sum_{i=1}^A U_i(\mathbf{d}_i) - \sum_{j=1}^G C_j(\mathbf{s}_j) \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \sum_{k=1}^{V_i} d_{ik}^{\min} \leq \xi \sum_{j=1}^G d_{ij} \leq \sum_{k=1}^{V_i} d_{ik}^{\max}, \quad \forall i \in [A] \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^A s_{ij} \leq s_j^{\max}, \quad \forall j \in [G] \quad (5)$$

$$d_{ij} = s_{ij}, \quad \forall i \in [A], \forall j \in [G] \quad (6)$$

$$d_{ij}, s_{ij} \geq 0, \quad \forall i \in [A], \forall j \in [G] \quad (7)$$

式中, s_j^{\max} 为分布式能源 j 的最大发电量。式(6)表示电能的供需平衡。SW问题是典型的约束优化问题,可以通过计算KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件求解,而且其目标函数是凹的,故可以得到全局最优解。对约束式(4)~式(6)进行松弛,SW问题的Lagrange函数表示为:

$$L(\mathbf{d}, \mathbf{s}, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = \sum_{i=1}^A U_i(\mathbf{d}_i) - \sum_{j=1}^G C_j(\mathbf{s}_j) + \sum_{i=1}^A \alpha_i \left(\sum_{k=1}^{V_i} d_{ik}^{\min} - \xi \sum_{j=1}^G d_{ij} \right) + \sum_{i=1}^A \beta_i \left(\xi \sum_{j=1}^G d_{ij} - \sum_{k=1}^{V_i} d_{ik}^{\max} \right) +$$

$$\sum_{j=1}^G \lambda_j \left(\sum_{i=1}^A s_{ij} - s_j^{\max} \right) + \sum_{j=1}^G \sum_{i=1}^A \mu_{ij} (d_{ij} - s_{ij}) \quad (8)$$

式中, $\lambda \triangleq \{\lambda_j | j \in [G]\}$; $\mu \triangleq \{\mu_{ij} | i \in [A], j \in [G]\}$; $\alpha \triangleq \{\alpha_i | i \in [A]\}$; $\beta \triangleq \{\beta_i | i \in [A]\}$ 。SW问题的最优解满足如下KKT条件:

$$\frac{r_i}{\xi \sum_{j=1}^G d_{ij} - \sum_{k=1}^{V_i} d_{ik}^{\min} + 1} - \xi \alpha_i + \xi \beta_i + \mu_{ij} = 0 \quad (9)$$

$$-2c_{1,j} \left(\sum_{i=1}^A s_{ij} \right) - c_{2,j} + \lambda_j - \mu_{ij} = 0 \quad (10)$$

代理商在求解SW问题时, 需要知道汇集商的满意度函数和分布式能源的成本函数。但由于隐私或欺骗等问题, 代理商不一定能获得真实的函数信息。这时直接求解SW问题就变得不可行。

2 双边拍卖机制

把双边拍卖机制应用到电动汽车充电市场中, 汇集商(买方)和分布式能源(卖方)对电能进行出价, 代理商(拍卖师)根据出价来确定电能交易量以及交易价格。这样可避免买卖双方直接披露隐私信息。

2.1 买方

用 b_{ij} 表示汇集商 i 对能源 j 的电能买入价(bid price), 故汇集商 i 出价向量表示为 $\mathbf{b}_i \triangleq \{b_{ij} | j \in [G]\}$, 所有汇集商的出价表示为 $\mathbf{b} \triangleq \{\mathbf{b}_i | i \in [A]\}$ 。汇集商 i 需要求解下面的买方(buyer, B)问题, 从而确定最优的买入价为:

$$\text{B: } \max_{\mathbf{b}_i} [U_i(\mathbf{d}_i) - P_i(\mathbf{b}_i)] \quad (11)$$

式中, $P_i(\mathbf{b}_i)$ 为买方的支付函数, 由拍卖师决定。

2.2 卖方

用 a_{ij} 表示分布式能源 j 对汇集商 i 的电能卖出价(ask price), 故分布式能源 j 的出价向量表示为 $\mathbf{a}_j \triangleq \{a_{ij} | i \in [A]\}$, 所有分布式能源的出价表示为 $\mathbf{a} \triangleq \{\mathbf{a}_j | j \in [G]\}$ 。分布式能源 j 需要求解下面的卖方(seller, S)问题, 从而确定最优的卖出价为:

$$\text{S: } \max_{\mathbf{a}_j} [R_j(\mathbf{a}_j) - C_j(\mathbf{s}_j)] \quad (12)$$

式中, $R_j(\mathbf{a}_j)$ 为卖方的收益函数, 由拍卖师决定。

2.3 拍卖师

汇集商和分布式能源把出价提交给代理商, 代理商需要求解下面的拍卖师(auctioneer, A)问题^[8-9], 从而计算出电能的交易量为:

$$\text{A: } \max_{\mathbf{d}, \mathbf{s}} \sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^G \left(b_{ij} \ln d_{ij} - \frac{1}{2} a_{ij} s_{ij}^2 \right)$$

$$\text{s.t. 式(4)~式(7)} \quad (13)$$

式(13)中目标函数的构建与买卖方(满意度和成本)函数的凹凸性有关。因为汇集商的满意度函数是凹的, 故增添一个凹成分(对数运算)来获取其函数的凹特征。类似地, 增添一个凸成分(平方运算)来获取分布式能源成本函数的凸特性。由式(13)可知, 代理商求解A问题时只需要知道买卖方的出价。A问题与SW问题有同样的约束条件, 且目标函数也是凹的, 所以也可以通过计算KKT条件求解。A问题的Lagrange函数为:

$$\begin{aligned} \tilde{L}(\mathbf{d}, \mathbf{s}, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = & \sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^G \left(b_{ij} \ln d_{ij} - \frac{1}{2} a_{ij} s_{ij}^2 \right) + \\ & \sum_{i=1}^A \alpha_i \left(\sum_{k=1}^{V_i} d_{ik}^{\min} - \xi \sum_{j=1}^G d_{ij} \right) + \sum_{i=1}^A \beta_i \left(\xi \sum_{j=1}^G d_{ij} - \sum_{k=1}^{V_i} d_{ik}^{\max} \right) + \\ & \sum_{j=1}^G \lambda_j \left(\sum_{i=1}^A s_{ij} - s_j^{\max} \right) + \sum_{j=1}^G \sum_{i=1}^A \mu_{ij} (d_{ij} - s_{ij}) \end{aligned} \quad (14)$$

A问题的最优解满足如下KKT条件:

$$\frac{b_{ij}}{d_{ij}} - \xi \alpha_i + \xi \beta_i + \mu_{ij} = 0 \quad (15)$$

$$-a_{ij} s_{ij} + \lambda_j - \mu_{ij} = 0 \quad (16)$$

为了使得A问题的最优解也是SW问题的最优解, 需要保证它们的KKT条件是一致的。由式(9)、式(10)、式(15)、式(16)可得:

$$b_{ij} = \frac{r_i d_{ij}}{\xi \sum_{j=1}^G d_{ij} - \sum_{k=1}^{V_i} d_{ik}^{\min} + 1} \quad (17)$$

$$a_{ij} = \frac{1}{s_{ij}} \left[2c_{1,j} \left(\sum_{i=1}^A s_{ij} \right) + c_{2,j} \right] \quad (18)$$

这意味着, 当买方和卖方的出价分别满足式(17)和式(18)时, A问题的最优解就是SW问题的最优解。

2.4 定价规则

代理商需要确定买方支付金额和卖方出售金额。买方支付函数和卖方收益函数分别表示为:

$$P_i(\mathbf{b}_i) = \sum_{j=1}^G b_{ij} \quad (19)$$

$$R_j(\mathbf{a}_j) = \sum_{i=1}^A \frac{1}{a_{ij}} (\mu_{ij} - \lambda_j)^2 \quad (20)$$

定理 1 由式(19)和式(20)给定的定价规则可以使得A问题的最优解与SW问题的最优解一致。

证明: 由式(11)可知, 汇集商的最优买入价应该满足:

$$\frac{\partial U_i(\mathbf{d}_i)}{\partial b_{ij}} - \frac{\partial P_i(\mathbf{b}_i)}{\partial b_{ij}} = 0 \quad (21)$$

由式(15)可得:

$$\frac{\partial b_{ij}}{\partial d_{ij}} = \xi \alpha_i - \xi \beta_i - \mu_{ij} \quad (22)$$

把式(19)和式(22)代入式(21)可得:

$$b_{ij} = d_{ij} \frac{\partial U_i(\mathbf{d}_i)}{\partial d_{ij}} = \frac{r_i d_{ij}}{\xi \sum_{j=1}^G d_{ij} - \sum_{k=1}^{V_i} d_{ik}^{\min} + 1} \quad (23)$$

可见式(23)与式(17)一致。由式(12)可知,分布式能源的最优卖出价应该满足:

$$\frac{\partial R_j(\mathbf{a}_j)}{\partial a_{ij}} - \frac{\partial C_j(\mathbf{s}_j)}{\partial a_{ij}} = 0 \quad (24)$$

由式(16)可得:

$$\frac{\partial a_{ij}}{\partial s_{ij}} = (\mu_{ij} - \lambda_j) s_{ij}^{-2} \quad (25)$$

把式(20)和式(25)代入式(24)可得:

$$a_{ij} = \frac{1}{s_{ij}} \frac{\partial C_j(\mathbf{s}_j)}{\partial s_{ij}} = \frac{1}{s_{ij}} \left[2c_{1,j} \left(\sum_{i=1}^A s_{ij} \right) + c_{2,j} \right] \quad (26)$$

可见式(26)与式(18)一致。

因此,由式(19)和式(20)给定的定价规则可以使最优买入价满足式(17),也使得最优卖出价满足式(18)。所以,代理商A问题的最优解与SW问题的最优解一致。证毕

3 迭代双边拍卖算法

由以上双边拍卖机制可知,汇集商和分布式能源分别求解B问题和S问题时,需要代理商提供的电能供需信息 \mathbf{d} 和 \mathbf{s} ;代理商求解A问题时,需要买卖双方提交的出价信息 \mathbf{b} 和 \mathbf{a} 。因此,B、S、A问题的求解需要通过迭代的方式进行。迭代过程中,代理商与买卖双方不断交换信息,直到拍卖结果不再改变。算法1给出迭代双边拍卖算法的具体步骤。

算法1: 迭代双边拍卖算法

1) 初始化: $\mathbf{d}^{(0)}, \mathbf{s}^{(0)}, \boldsymbol{\lambda}^{(0)}, \boldsymbol{\mu}^{(0)}, \varepsilon$;

2) $t \leftarrow 0$; $\text{flag}_{\text{conv}} \leftarrow 0$;

3) while $\text{flag}_{\text{conv}} = 0$ do

4) $t \leftarrow t + 1$;

5) 汇集商求解B问题,提交买入价 $\mathbf{b}^{(t)}$;

6) 分布式能源求解S问题,提交卖出价 $\mathbf{a}^{(t)}$;

7) 拍卖师求解A问题,得到 $\mathbf{d}^{(t)}, \mathbf{s}^{(t)}$,并广播定价规则的参数 $\boldsymbol{\lambda}^{(t)}, \boldsymbol{\mu}^{(t)}$;

$$8) \text{ if } \left| \frac{b_{ij}^{(t)} - b_{ij}^{(t-1)}}{b_{ij}^{(t)}} \right| < \varepsilon \text{ 且 } \left| \frac{a_{ij}^{(t)} - a_{ij}^{(t-1)}}{a_{ij}^{(t)}} \right| < \varepsilon ,$$

$\forall i \in [A], \forall j \in [G]$ then

9) $\text{flag}_{\text{conv}} \leftarrow 1$;

10) end if

11) end while

12) 输出: $\mathbf{d}^*, \mathbf{s}^*, \boldsymbol{\lambda}^*, \boldsymbol{\mu}^*, P(\mathbf{b}^*), R(\mathbf{a}^*)$ 。

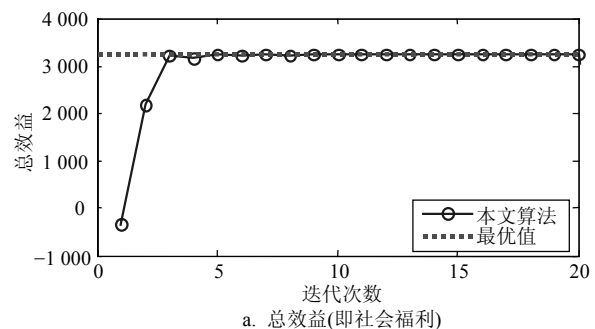
算法中, ε 为一个极小的常数,用于判定算法收敛。

该算法的特点在于,把集中式的SW问题拆分成汇集商的B问题、分布式能源的S问题、代理商的A问题。它们分别独立求解自身的最优化问题,然后交换计算结果。这种机制更加适用于电动汽车充电市场,代理商无需知道买卖方的隐私信息(满意度函数和成本函数),仅根据买卖方的出价就能使得A问题的解收敛至SW问题的解,从而优化双方总效益。

4 仿真结果与分析

仿真场景基于文献[4]中的无线充电系统设计,其中汇集商能够实时获取车的航线信息并控制车的充电。仿真中,主要分析单个时段内算法的性能。为了便于分析,首先考虑 $A=2$ 和 $G=2$ 的情况,即两个汇集商和两个分布式能源。令 $V_1=300$ 和 $V_2=200$,即汇集商1和2分别有300和200辆电动汽车需要充电。对于 $\forall i \in [A], \forall k \in [V_i], \forall j \in [G]$,有如下参数设置: $d_{ik}^{\max} = 1, d_{ik}^{\min} = 0.3, d_{2k}^{\min} = 0.4, s_1^{\max} = 500, s_2^{\max} = 600, r_1 = r_2 = 500, c_{1,1} = 0.01, c_{1,2} = 0.02, c_{2,j} = c_{3,j} = 0, \xi = 0.8$ 。

图2给出迭代双边拍卖算法的收敛性能。图2a中虚线表示通过直接求解SW问题得到的总效益最优值,但这种方案需要买卖方的隐私信息。可见,本方双边拍卖算法的总效益在第5次迭代后可以稳定在最优值上,收敛速度快,且无需隐私信息。图2b给出本文算法的电能需求量和供应量的收敛情况。因为约束条件式(6),所以需求量与供应量相等。



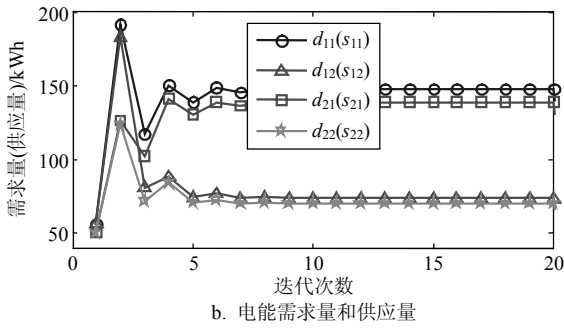


图2 迭代双边拍卖算法的收敛性能

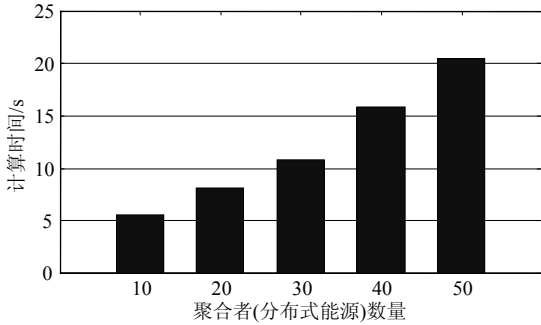


图3 总效益收敛至最优值所用的计算时间

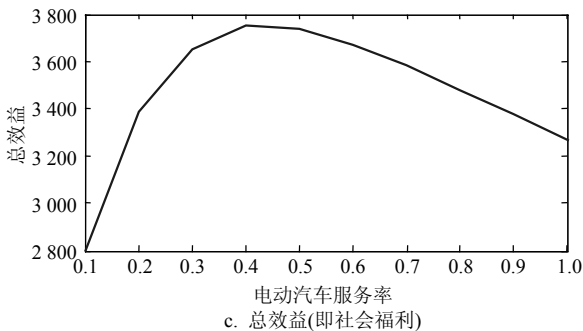
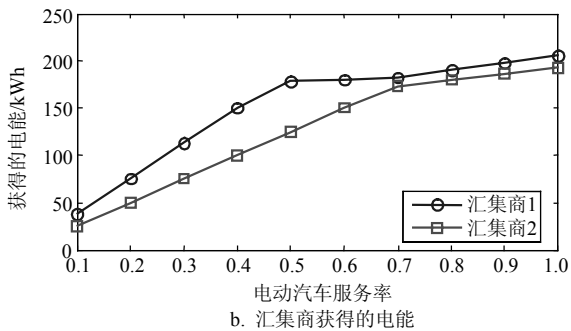
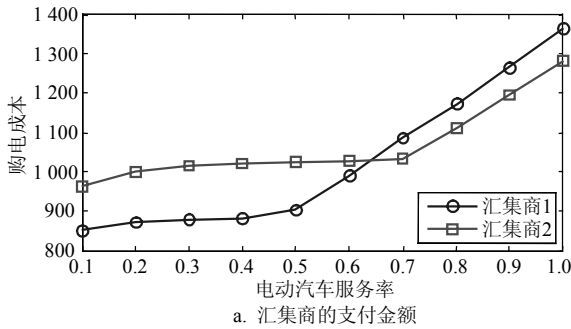


图4 汇集商的电动汽车服务率(电动汽车数量)对电能交易结果的影响

接下来分析汇集商和分布式能源的数量对收敛速度的影响。参数设置如下, 对于 $\forall i \in [A], \forall k \in [V_i], \forall j \in [G],$ 有 $d_{ik}^{\min} = [0.3, 0.4], s_j^{\max} = [500, 600], c_{i,j} = [0.01, 0.02],$ 即参数的取值为其区间内的均匀分布。其余参数设置与之前相同。仿真结果表明, 本文算法的收敛迭代次数不会随着买卖双方数量增加而增加。通常, 第5次迭代后的总效益就收敛至最优值。但由于买卖双方数量增加, 代理商求解A问题的时间会增加。图3给出总效益收敛至最优值所用的时间。

最后分析电动汽车数量对电能交易结果的影响。考虑两个汇集商和两个分布式能源的情况。设汇集商1和2分别最多可同时服务300和200辆电动汽车。电动汽车服务率等于当前服务车数与最大服务车数的比值。由图4a可见, 汇集商1在0.5服务率后购电成本大幅增长, 此时其服务车数为 $300 \times 0.5 = 150$ 。汇集商2在0.7服务率后也有类似的增长, 此时其服务车数为 $200 \times 0.7 = 140$ 。可见, 当总充电车数大约为290后, 分布式能源的发电成本将大大增加, 使得汇集商购电成本也随之增加。图4b表明, 购电成本大幅增加后, 汇集商会减少电能获取量的增量。图4c中, 总效益前半段上升的主要原因是电动汽车满意度的提升, 而总效益后半段下降的原因主要来自于分布式能源发电成本的上升。

5 结束语

针对电动汽车无线充电市场, 采用迭代双边拍卖算法进行电能供需匹配。汇集商和分布式能源按照自身效益最大化原则进行出价, 代理商无需买卖方的隐私信息, 仅根据他们的出价进行电能分配和定价。仿真结果表明, 本文算法可以使得最终的买卖双方总效益收敛至最优值, 而且有较强的收敛速度, 能保证电动汽车无线充电市场中电能分配的高效性。

本文的研究工作得到了广州市珠江科技新星项目(2014J2200097)的资助, 在此表示感谢!

参 考 文 献

[1] LUKIC S, PANTIC Z. Cutting the cord: Static and dynamic inductive wireless charging of electric vehicles[J]. IEEE Electrification Magazine, 2013, 1(1): 57-64.
 [2] KO Y D, JANG Y J. The optimal system design of the online electric vehicle utilizing wireless power transmission technology[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(3): 1255-1265.

(下转第889页)

- 2008, 42(5): 95-103.
- [3] DONG Y, LI S, MALLICK A, et al. Extending Xen with intel virtualization technology[J]. Intel Technology Journal, 2006, 10(3): 193-203.
- [4] KIVITY A, KAMAY Y, LAOR D, et al. KVM: the Linux virtual machine monitor[C]//Proceedings of the Linux symposium. Ottawa: Proc Linux Symposium, 2007, 1: 225-230.
- [5] DALL C, NIEH J. KVM/ARM: the design and implementation of the linux ARM hypervisor[J]. ACM SIGARCH Computer Architecture News, 2014, 42(1): 333-348.
- [6] HWANG J Y, SUH S B, HEO S K, et al. Xen on ARM: System virtualization using Xen hypervisor for ARM-based secure mobile phones[C]//Consumer Communications and Networking Conference, 2008, CCNC 2008, 5th IEEE. Las Vegas: IEEE, 2008: 257-261.
- [7] LEE S M, SUH S B, JEONG B, et al. Fine-grained i/o access control of the mobile devices based on the xen architecture[C]//Proceedings of the 15th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Beijing: ACM, 2009: 273-284.
- [8] VARANASI P, HEISER G. Hardware-supported virtualization on ARM[C]//Proceedings of the Second Asia-Pacific Workshop on Systems. Shanghai: ACM, 2011: 11.
- [9] SOLTESZ S, PÖTZL H, FIUCZYNSKI M E, et al. Container-based operating system virtualization: a scalable, high-performance alternative to hypervisors[C]//ACM SIGOPS Operating Systems Review. Lisbon: ACM, 2007, 41(3): 275-287.
- [10] Enterprise Mobility Solutions Samsung Electronics Co. Ltd. White paper: an overview of samsung KNOX™[EB/OL]. [2013-06-01]. http://www.samsung.com/global/business/business-images/resource/white-paper/2013/06/Samsung_KNOX_whitepaper_June-0.
- [11] LBE Tech. Parallel space[EB/OL]. [2016-06-03]. <http://parallel-app.com/>.
- [12] YANG Xia, SUN Chao-qun. Research and implementation of multiple Android systems based on the container technique[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2016, 37(7): 1422-1427.
- [13] Google Inc. Hardware abstraction layer[EB/OL]. [2016-06-03]. <http://source.android.com/devices/index.html#Hardware-Abstraction-Layer>.

编辑 漆蓉

(上接第865页)

- [3] JEONG S, JANG Y J, KUM D. Economic analysis of the dynamic charging electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6368-6377.
- [4] THEODOROPOULOS T V, DAMOUSIS I G, AMDITIS A J. Demand side management ICT for dynamic wireless EV charging[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6623-6630.
- [5] OTT A L. Experience with PJM market operation, system design, and implementation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 528-534.
- [6] DRIESEN J, KATIRAEI F. Design for distributed energy resources[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 30-40.
- [7] OU C H, LIANG H, ZHUANG W. Investigating wireless charging and mobility of electric vehicles on electricity market[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 3123-3133.
- [8] IOSIFIDIS G, GAO L, HUANG J, et al. A double-auction mechanism for mobile data-offloading markets[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2015, 23(5): 1634-1647.
- [9] MAJUMDER B P, FAQIRY M N, DAS S, et al. An efficient iterative double auction for energy trading in microgrids[C]//2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications in Smart Grid (CIASG). [S.l.]: IEEE, 2014: 1-7.

编辑 漆蓉