

考虑备用服务的电动汽车代理商竞价与定价联合优化

杨思渊,姜子卿,艾 芊

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240)

摘要:电动汽车代理商(EVA)的出现有望改善电网与大规模电动汽车的互动用电问题。以EVA为研究对象,分析其运营过程中的购、售电市场行为,提出其参与备用服务市场后的竞价与定价联合优化方法,以提高代理商在参与电网能量交易中的经济收益并降低电动汽车的充电成本。在建立日前能量市场和备用服务市场的统一出清模型的基础上,考虑EVA与车主的主从博弈,建立EVA的竞价与定价策略的双层优化模型,得到EVA在日前市场的最优竞价策略和充电费用的制定策略。通过算例分析表明所提模型的有效性,验证所提策略的经济性和灵活性。

关键词:电动汽车;电动汽车代理商;竞价策略;定价策略;双层优化;备用服务;联合优化

中图分类号:TM 761;U 469.72

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.12.004

0 引言

大力发展电动汽车EV(Electric Vehicle)能够加快燃油替代、减少汽车尾气排放,对保障能源安全、促进节能减排、防治大气污染具有重要的意义^[1]。但随着大规模EV接入电网无序充电,配电网的电能质量、可靠性和运行经济性将受到影响^[2]。由调度机构对EV进行直接调度的方式对通信网络和计算复杂度的要求极高,难以在大规模电力系统中实现。因此,有必要引入电动汽车代理商EVA(EV Aggregator)这一角色对所辖区域内的EV进行协调调度,实现分层分区调度方式。

随着电力市场交易体制的逐渐完善,发电侧和售电侧主体的竞争将逐渐充分。EVA本质上是提供充电桩运营服务的售电商,其根据所代理EV群体的日充电需求,在日前市场进行竞标购电,在实现盈利的同时能提高EV车主的经济性。多个EVA的报价和充电调度会对市场电价产生影响,不同的竞标结果将影响EVA向EV车主收取的充电费用,因此研究EVA的竞价和定价策略具有重要的意义。

目前,国内外的研究大多集中于基于EVA的有序充电引导^[3]和充放电调度控制^[4-6],也有少部分对EV在电力市场中的竞标策略进行研究。文献[7]考虑了EV运营商分别作为价格接受者和价格影响者参与电力市场的古诺均衡模型,但其主要从市场均衡的角度进行分析;文献[8]提出了估计对手策略的博弈报价决策,但只考虑参与日前能量市场并未考虑电网安全约束。且以上文献均未考虑EV个体充电的自主性。文献[9-10]考虑了市场价格和

EV需求等随机因素,但忽略了其他市场竞争者和市场出清结果对竞价策略的影响。文献[11-12]用条件风险价值(CVaR)对EV市场竞价模型中的实时电价、负荷和可再生能源预测等风险因素建模。文献[13]构造了EVA参与日前和实时电能市场的二层竞标策略模型,但只涉及了EVA参与电能市场的购电服务。还有一些文献对EV仅参与调节、备用服务市场^[14]和需求侧^[15]的竞价策略进行了研究,但并未考虑电能市场和备用市场联合出清的竞价策略。

目前,已有文献大多研究EVA与上层配电网的竞价策略,很少涉及EVA与下层EV车主的利益分配。文献[16]建立了EVA、车主各自追求利益最大化时的主从博弈模型,从而确定EVA的最优定价策略。文献[17]建立了考虑用户参与度的EV能效电厂模型,为能效电厂参与电力市场的交易机制提供了模型基础。但以上文献都未考虑EVA在市场中作为价格影响者受车主策略影响而调整的购电策略。

针对上述问题,本文以EVA为研究对象,构建了计及备用服务的EVA竞价与定价联合优化模型。首先,建立日前能量市场、备用市场的统一出清模型;然后,考虑EVA与车主的主从博弈,建立了EVA和车主的双层优化模型,结合日前市场出清模型,得到EVA在日前市场的最优竞价策略、充电价格的制定策略。算例结果表明,本文所提策略提高了EVA在参与电网能量交易中的经济收益,并降低了EV车主的总充电成本,同时该策略具有一定的灵活性。

1 EVA市场运营模式

在完全竞争的电力市场环境下,EVA作为发电商与EV车主之间的中介,在分层分区调度框架下与其他购电商一同参与电力市场并优化EV的充电行为,如图1所示。

收稿日期:2018-01-16;修回日期:2018-10-12

基金项目:国家自然科学基金-国家电网联合基金资助项目(U1766207)

Project supported by the National Natural Science and State Grid Joint Foundation of China(U1766207)

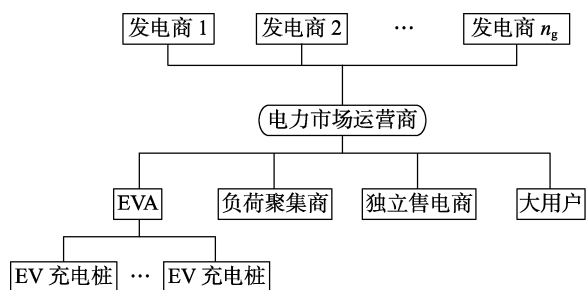


图 1 系统分布式架构

Fig.1 Distributed architecture of system

在日前能量市场中,发电商作为独立的经济实体,根据自身的发电成本向电力市场运营商 ISO (Independent System Operator) 申报电价随电量递增的竞价函数和最大/最小发电功率,用电侧(EVA、大用户、负荷聚集商和其他独立售电商)向电力市场运营商申报非递减竞价函数和最大供电功率。电力市场运营商根据统一的边际价格进行市场出清和结算。

车网互动 V2G (Vehicle-to-Grid) 作为重要的需求侧资源,有降低 EV 运营成本并增强电网灵活性的潜力。EVA 可通过控制大量 EV 的实际与计划充放电功率 POP (Preferred Operating Point) 的偏差来参与备用市场竞价,以获得收益并降低充电成本。由于充放一体机的设施成本昂贵,且频繁或深度充电/放电会减少电池寿命,本文暂不考虑双向 V2G,即假设 EV 用户不接受放电。单向 V2G 仍可参与备用市场,在系统需要备用容量时,EVA 能在较短的时间内削减部分充电负荷,相当于向系统提供了旋转备用,上调备用、下调备用可在 POP 的基础上增加或减少充电功率流动来实现。故电力市场运营商允许 EVA 申报在规定时间内能提供的负荷容量和单位报价,进入备用市场参与备用容量竞标。

EVA 与 EV 车主签订合同后,车主需在日前向 EVA 申报次日的相关信息:接入系统的时间,离开系统的时间,离开时期望荷电状态 SOC (State Of Charge) 的上限、下限。EVA 将车主上报的信息汇总后,依据充电时段对接入系统的 EV 进行分群,估计总充电需求量和可调度容量 APC (Achievable Power Capacity),在日前能量市场和备用市场中竞价。EVA 在日前市场交易结束后制定充电价格并公布给车主。充电桩内设的智能通断终端根据 EVA 提供的电价信息自动选择可接入系统时间内的低价时段执行充电。假定采用标准化生产后,EV 蓄电池的平均充电功率和蓄电池容量相同。实际运行中若有电量偏差,EVA 再进入实时市场购电、售电。

2 EVA 竞价与定价策略

2.1 日前能量市场与备用市场统一出清模型

由于备用市场与能量市场之间的耦合性较强,因此美国 PJM、新西兰电力市场在实际运行中将 2

个市场的决策过程统一进行^[18]。假设参与竞标的有 M 个发电商和 K 个购电商,两者都可在能量市场和备用市场中竞价,备用市场中暂时忽略市场对调节备用和非旋转备用的要求,只考虑旋转备用。其中,购电商包括 EVA、大用户、负荷聚集商和其他独立售电商等,其余购电商的竞价策略与 EVA 相同,此处以 EVA 为例进行分析。

设 EVA 的边际效益函数是线性的,反映了大量用户的充电负荷与其愿意支付的价格之间的平均水平,则其报价函数^[19]为:

$$\rho_{t,k}^{\text{EV,C}} = a_{t,k} - b_{t,k} Q_{t,k}^{\text{EV,C}} \quad k=1,2,\dots,K; t=1,2,\dots,T \quad (1)$$

其中, t 为报价时刻; T 为总报价时刻数; $Q_{t,k}^{\text{EV,C}}$ 为能量市场中第 k 个购电商在时刻 t 申报的购电量; $\rho_{t,k}^{\text{EV,C}}$ 为第 k 个购电商在时刻 t 的日前能量市场申报价格; $a_{t,k}$ 、 $b_{t,k}$ 为第 k 个购电商在时刻 t 的策略报价系数,与边际效益参数有关。竞标策略参数的选择有变截距、变斜率和变比例等方法^[20],本文采用变斜率方法,即通过改变斜率 $b_{t,k}$ 进行策略报价, $a_{t,k}$ 保持不变。

同理,购电商在备用市场的报价函数可表示为:

$$\rho_{t,k}^{\text{EV,R}} = e_{t,k}^{\text{EV}} + f_{t,k}^{\text{EV}} Q_{t,k}^{\text{EV,R}} \quad (2)$$

其中, $\rho_{t,k}^{\text{EV,R}}$ 为第 k 个购电商在时刻 t 的备用市场申报价格; $e_{t,k}^{\text{EV}}$ 、 $f_{t,k}^{\text{EV}}$ 为第 k 个购电商在时刻 t 的备用市场报价参数; $Q_{t,k}^{\text{EV,R}}$ 为备用市场中第 k 个购电商在时刻 t 申报的备用容量。当联合出清时,备用市场以容量价格作为竞价依据;当旋转备用被实际调用时,以能量市场的出清价作为电量价格补偿。

发电商的报价曲线由其边际成本函数获得,如式(3)所示。

$$\rho_{t,m}^{\text{G,C}} = c_{t,m} + d_{t,m} Q_{t,m}^{\text{G,C}} \quad m=1,2,\dots,M; t=1,2,\dots,T \quad (3)$$

其中, $c_{t,m}$ 、 $d_{t,m}$ 为报价参数; $\rho_{t,m}^{\text{G,C}}$ 为第 m 个发电商在时刻 t 的日前能量市场申报价格; $Q_{t,m}^{\text{G,C}}$ 为第 m 个发电商在时刻 t 的申报售电量。本文假设发电商按照自身的边际成本参数进行报价。发电商在备用市场的报价函数可表示为:

$$\rho_{t,m}^{\text{G,R}} = e_{t,m}^{\text{G}} + f_{t,m}^{\text{G}} Q_{t,m}^{\text{G,R}} \quad (4)$$

其中, $\rho_{t,m}^{\text{G,R}}$ 为第 m 个发电商在时刻 t 的备用市场申报价格; $e_{t,m}^{\text{G}}$ 、 $f_{t,m}^{\text{G}}$ 为第 m 个发电商在时刻 t 的备用市场报价参数,反映了机组部分载荷效率损失; $Q_{t,m}^{\text{G,R}}$ 为备用市场中第 m 个发电商在时刻 t 申报的电量。

电力市场运营商收到各市场成员的报价曲线后,根据最小化电能与辅助服务供应总成本的原则进行联合市场出清,确定统一能量市场的出清价格 ρ_t^{C} 和备用市场出清价格 ρ_t^{R} ,并分配各发电商的出力

和备用容量以及购电商的购电量和备用容量。当交易撮合成功时,能量市场和备用市场的出清价格将满足式(5)。

$$\begin{cases} a_{t,k} - b_{t,k} Q_{t,k}^{\text{EV,C}} = \rho_t^{\text{C}} \\ c_{t,m} + d_{t,m} Q_{t,m}^{\text{g,C}} = \rho_t^{\text{C}} \\ e_{t,m}^{\text{g}} + f_{t,m}^{\text{g}} Q_{t,m}^{\text{g,R}} = \rho_t^{\text{R}} \\ e_{t,k}^{\text{EV}} + f_{t,k}^{\text{EV}} Q_{t,k}^{\text{EV,R}} = \rho_t^{\text{R}} \end{cases} \quad (5)$$

同时,发电商和购电商的出清电量需满足电量平衡约束和出力上下限约束,分别如式(6)、式(7)所示。

$$\begin{cases} \sum_m Q_{t,m}^{\text{g,C}} = \sum_k Q_{t,k}^{\text{EV,C}} \\ \sum_m Q_{t,m}^{\text{g,R}} + \sum_k Q_{t,k}^{\text{EV,R}} = Q_t^{\text{SR}} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} P_m^{\text{g,min}} \leq Q_{t,m}^{\text{g,C}} \\ Q_{t,m}^{\text{g,C}} + Q_{t,m}^{\text{g,R}} \leq P_m^{\text{g,max}} \\ 0 \leq Q_{t,m}^{\text{g,R}} \leq \bar{Q}_m^{\text{g,R}} \\ Q_{t,k}^{\text{EV,C}} \leq P_k^{\text{EV,max}} \\ P_k^{\text{EV,min}} \leq Q_{t,k}^{\text{EV,C}} - Q_{t,k}^{\text{EV,R}} \\ 0 \leq Q_{t,k}^{\text{EV,R}} \leq \bar{Q}_k^{\text{EV,R}} \end{cases} \quad (7)$$

其中, Q_t^{SR} 为时刻 t 系统对旋转备用容量的要求; $P_m^{\text{g,min}}$ 、 $P_m^{\text{g,max}}$ 分别为第 m 个发电商的发电出力下限、上限; $\bar{Q}_m^{\text{g,R}}$ 、 $\bar{Q}_k^{\text{EV,R}}$ 分别为第 m 个发电商和第 k 个购电商的备用能力上限约束; $P_k^{\text{EV,min}}$ 、 $P_k^{\text{EV,max}}$ 分别为第 k 个购电商的用电负荷最小值、最大值。

当不考虑式(7)所示约束时,求解式(1)~(6)可得:

$$\rho_t^{\text{C}} = \frac{\sum_m \frac{c_{t,m}}{d_{t,m}} + \sum_k \frac{a_{t,k}}{b_{t,k}}}{\sum_m \frac{1}{d_{t,m}} + \sum_k \frac{1}{b_{t,k}}} \quad (8)$$

$$Q_{t,m}^{\text{g,C}} = \frac{\rho_t^{\text{C}} - c_{t,m}}{d_{t,m}} \quad (9)$$

$$Q_{t,k}^{\text{EV,C}} = \frac{a_{t,k} - \rho_t^{\text{C}}}{b_{t,k}} \quad (10)$$

$$\rho_t^{\text{R}} = \frac{Q_t^{\text{SR}} + \sum_m \frac{e_{t,m}^{\text{g}}}{f_{t,m}^{\text{g}}} + \sum_k \frac{e_{t,k}^{\text{EV}}}{f_{t,k}^{\text{EV}}}}{\sum_m \frac{1}{f_{t,m}^{\text{g}}} + \sum_k \frac{1}{f_{t,k}^{\text{EV}}}} \quad (11)$$

$$Q_{t,m}^{\text{g,R}} = \frac{\rho_t^{\text{R}} - e_{t,m}^{\text{g}}}{f_{t,m}^{\text{g}}} \quad (12)$$

$$Q_{t,k}^{\text{EV,R}} = \frac{\rho_t^{\text{R}} - e_{t,k}^{\text{EV}}}{f_{t,k}^{\text{EV}}} \quad (13)$$

在交易撮合过程中,若违反式(7)所示约束,则置相应值为边界值,然后重新计算出清价格和出清电量,直到满足全部约束条件。

2.2 EVA 优化模型

当 EVA 运营到一定的规模时,其管辖的 EV 数量可能达数千甚至数万辆,若直接由 EVA 对充电装置进行调度,仍存在通信网络和计算复杂度等问题。通过价格响应的方式来调度 EV 充电可以避免该问题,即通过日前制定实时充电电价,由智能充电桩自动选择电价低的时段控制 EV 充电,直至充电电量达到车主的要求。充电费用为基本电费与充电补贴之差。EVA 在市场竞争中的弹性来源于车主充电负荷的弹性,即充电负荷的可转移性及可削减性。可转移性通过制定充电基本电价使用户通过智能充电桩自主转移负荷来实现;可削减性通过制定充电补贴鼓励用户申报充电要求范围来实现。

EVA 的竞价与定价问题本质上是一个双层优化问题,可用主从博弈进行求解。上层优化中,EVA 先以自身收益最大化为原则、以市场出清为约束决策竞价参数和充电价格,是主从博弈的领导者;下层优化中,每辆 EV 以充电成本最小化为目标,通过智能充电桩决策每个时段的实际充电功率,是主从博弈的跟随者。跟随者根据领导者决策的实时充电电价选择自己的最优充电计划,领导者再根据跟随者的充电计划更新自己的策略,不断更新直至达到均衡解,即 EVA 得到最优的竞价参数和实时充电电价,EV 用户得到最优的充电计划。双层优化模型示意图如图 2 所示。

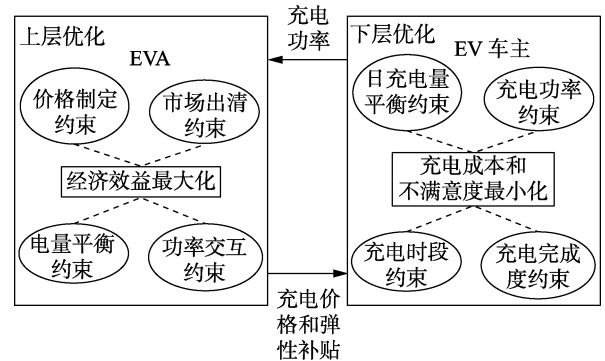


图 2 双层优化模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of bi-level optimization model

以多个购电商中的某一个 EVA 为研究对象(以下竞价参数省略下标 k),EVA 的决策变量为任意时刻 t 的 $\{b_t, f_t^{\text{EV}}, \pi_t, \Delta\pi, Q_t^{\text{RT+}}\}$,其中 b_t 和 f_t^{EV} 分别为该 EVA 在能量市场和备用市场内的竞价斜率参数, π_t 为 EVA 制定的充电基本电价, $\Delta\pi$ 为 EVA 制定的充电弹性补贴, $Q_t^{\text{RT+}}$ 为 EVA 在实时市场的购电量,则优化问题建模如下:

$$\begin{aligned} \max \sum_i & \left[h_i^{\text{user}}(\pi_i, \Delta\pi_i, \sum_i P_{t,i}^{\text{EV}}) + \right. \\ & \left. h_i^{\text{mar}}(Q_i^{\text{EV,C}}, Q_i^{\text{EV,R}}, Q_i^{\text{RT+}}, Q_i^{\text{RT-}}) \right] = \\ & \sum_i \left\{ \pi_i(1-U_{L,i}) \sum_i P_{t,i}^{\text{EV}} - \Delta\pi \sum_i [(\chi_i^e - \chi_i) E_i^{\text{max}}] + \right. \\ & \rho_i^{\text{R}} Q_i^{\text{EV,R}} + \xi_i \rho_i^{\text{C}} Q_i^{\text{EV,C}} + \rho_i^{\text{RT-}} Q_i^{\text{RT-}} - \\ & \left. \rho_i^{\text{RT+}} Q_i^{\text{RT+}} - \rho_i^{\text{C}} Q_i^{\text{EV,C}} \right\} \quad (14) \end{aligned}$$

其中, h_i^{user} 为 EVA 从下层用户中获取的收益,即用户充电费用收入; h_i^{mar} 为 EVA 从上层市场中获取的收益,包括备用服务市场的容量和电量收入、实时市场的售电收入、实时市场的购电成本和日前市场的购电成本; E_i^{max} 为第 i 辆 EV 的最大电池容量; χ_i 为 EV 用户 i 的实际充电完成度; χ_i^e 为 EV 用户 i 的期望充电完成度,一般为 100%,即 EVA 用充电弹性补贴来激励用户降低实际充电完成度,从而有机会在日前市场中参与备用服务竞价; ξ_i 为调用比例预测值,即旋转备用实际调用容量占可用备用值的比例, ξ_i 越接近 1,则系统对备用的要求越严格,当 $\xi_i = 1$ 时,等同于确定性备用要求; $\rho_i^{\text{RT+}}$ 、 $\rho_i^{\text{RT-}}$ 分别为实时市场的购电电价、售电电价,可根据历史数据和预测模型估计; $Q_i^{\text{RT-}}$ 为 EVA 在实时市场的售电量。

在定价过程中, EVA 期望充电基本电价尽可能高而充电弹性补贴尽可能低,以最大化自身利润。为了避免 EVA 只将价格定于上下限,故引入虚拟用户流失率来衡量充电费用过高可能导致的用户失约或转投其他 EVA 带来的影响损失,如式(15)所示。

$$U_{L,i} = \omega_1 \frac{\pi_i}{\pi_i^{\text{max}}} + \omega_2 \frac{\Delta\pi^{\text{min}}}{\Delta\pi^{\text{min}} + \Delta\pi} \quad (15)$$

其中, $U_{L,i}$ 为虚拟用户流失率; ω_1 、 ω_2 为正常数,分别表示充电基本电价和充电弹性补贴的价格变量对用户流失的影响力,同时约束 $U_{L,i}$ 在 0~1 之间。

EVA 优化模型中的约束条件如下。

a. 充电负荷约束。 EVA 从市场的购电量与所有 EV 的充电量平衡:

$$\begin{aligned} & \xi_i(Q_i^{\text{EV,C}} + Q_i^{\text{RT+}} - Q_i^{\text{EV,R}} - Q_i^{\text{RT-}}) + \\ & (1 - \xi_i)(Q_i^{\text{EV,C}} + Q_i^{\text{RT+}} - Q_i^{\text{RT-}}) = \sum_i P_{t,i}^{\text{EV}} \quad (16) \end{aligned}$$

b. 充电基本电价约束。 为了保证车主的利益, EVA 制定的充电价格应有上、下界约束:

$$\pi_i^{\text{min}} \leq \pi_i \leq \pi_i^{\text{max}} \quad (17)$$

$$\Delta\pi^{\text{min}} \leq \Delta\pi \leq \Delta\pi^{\text{max}} \quad (18)$$

c. 考虑实时市场购电与售电之间的互补关系和配电网功率交互限制,有以下约束:

$$0 \leq Q_i^{\text{RT+}} \leq M_i \delta_i \quad (19)$$

$$0 \leq Q_i^{\text{RT-}} \leq M_i(1 - \delta_i) \quad (20)$$

其中, M_i 为实时交互功率限制,可取所有 EV 的最大充电功率之和; δ_i 为 0~1 变量,用以表征实时购售电互斥约束,即购电时 $\delta_i = 1$,售电时 $\delta_i = 0$ 。

除此之外,还包括市场出清约束式(7)、(8)、(10)、(11)、(13)。

2.3 EV 个体充电优化模型

主从博弈中 EVA 通过求解上层优化问题,制定最优充电基本电价和充电弹性补贴, EV 个体依据此电价通过求解下层优化模型来制定 24 h 的充电计划。由于 EVA 管理的 EV 数量庞大,首先对具有相似出行规律的 EV 进行聚类,其行为特征(最优充电功率)可由一次计算得到。EVA 聚合 EV 制定的充电策略后,得到相对准确的用户负荷曲线,再求解上层优化模型,以得到最优的竞价参数和充电售价。

EV 接入电网后,由智能充电桩决策具体的充电时段和功率。由于 EVA 对用户削减的充电负荷给予了弹性补贴,故 EV 的实际充电完成度可能未达到期望值,而是在经济性与充电完整度之间进行权衡。EV 的充电优化目标为最小化充电成本和充电不满意度,其中充电不满意度如式(21)所示。

$$D_i = z + \left(\frac{\chi_i - \chi_i^e}{\chi_i^e - \chi_i^{\text{min}}} \right)^2 \quad (21)$$

其中, χ_i^{min} 为满足 EV 用户 i 基本出行需求的最小充电完成度; z 为正常数。 $\chi_i \in [\chi_i^{\text{min}}, \chi_i^e]$, 则 $D_i \in [z, z+1]$ 。当实际充电完成度越接近用户期望值时, D_i 越小,即不满意度越小;反之亦然。

下层优化问题的决策变量为各时刻的充电功率和实际充电完成度 $\{P_{t,i}^{\text{EV}}, \chi_i\}$, 建模如下:

$$\begin{aligned} \{P_{t,i}^{\text{EV}}, \chi_i\} = \argmin & \left[\sum_{t \in T_i^{\text{EV}}} \pi_t P_{t,i}^{\text{EV}} - \Delta\pi (\chi_i^e - \chi_i) E_i^{\text{max}} \right] D_i \\ & \quad (22) \end{aligned}$$

$$\text{s.t. } \chi_i^{\text{min}} \leq \chi_i \leq \chi_i^e \quad (23)$$

$$\sum_t P_{t,i}^{\text{EV}} = \chi_i E_i^{\text{max}} - E_i^{\text{ini}} \quad (24)$$

$$P_{t,i}^{\text{EV}} = 0 \quad \forall t \notin T_i^{\text{EV}} \quad (25)$$

$$0 \leq P_{t,i}^{\text{EV}} \leq P_{t,i}^{\text{max}} \quad \forall t \in T_i^{\text{EV}} \quad (26)$$

其中, T_i^{EV} 为 EV 用户 i 接入系统的时间段; E_i^{ini} 为 EV 用户 i 接入系统时的初始电量。当 EV 用户 i 的实际充电完成度越小时,则该充电负荷的削减弹性越大,使得 EVA 在提供备用时更有竞争力,从而使总充电电价更优惠。但同时用户的充电满意度下降,可能使得总目标函数变大。

3 算例分析

3.1 参数设置

本文假设某区域的 EVA 管理 10 000 辆 EV, 研

究 EVA 的竞价和定价策略。本文算例中,以住宅区的 EVA 为例,假设申报的次日用户完成聚类后,可分为 3 种类型^[16],数量比例为 2:2:1。假设所有 EV 的电池型号相同,最大电池容量为 24 kW·h,最大充电功率为 3 kW,初始电量为 20%,期望充电完成度为 100%,其他行驶参数如表 1 所示。

表 1 EV 用户分类

Table 1 Classification of EV owners

EV 用户类型	可充电时段	最低充电完成度/%
A(早出晚归)	00:00—06:00, 18:00—24:00	70
B(自由充电)	00:00—08:00, 13:00—16:00, 23:00—24:00	60
C(晚出早归)	08:00—20:00	90

除了 EVA 外,参与日前市场竞标的还有 3 个发电商和 3 个购电商,其中只有 1 个发电商和 2 个购电商能参与备用市场竞标。发电商和购电商的成本函数参数取自文献[19],系统对旋转备用容量的要求取为系统有功负荷总量的 10%,实际调用比例按历史记录预测,被实际调用的旋转备用以日前出清电价作为电量价格补偿。设实时市场的购电价格为日前出清电价的 1.2~1.6 倍,售电价格则为日前出清电价的 40%~80%,以上实时价格满足区间内的均匀分布。EVA 制定的充电电价的上、下界分别定为日前出清电价的 1.3 倍、日前出清电价的 70%,充电补贴价格的上界为备用容量电价、下界为 0。

建立双层优化模型后,利用 YALMIP 工具箱对主从博弈进行迭代求解。为了便于分析本文所提模型(Case 1)的特点,另外设置 2 种对比场景:Case 2 中 EVA 不参与备用市场,也不提供充电弹性补贴;Case 3 中 EVA 作为价格接受者,即不考虑市场出清过程,购电价格按照分时电价计算,备用电价根据历史数据预测,见附录中图 A1。

3.2 EVA 和 EV 收益分析

采用 3.1 节所述数据,求解双层优化模型式(14)~(26),得到 EVA 的最大收益为 \$432.5, EV 的充电策略如图 3 所示,EVA 在日前市场的竞标结果及定价策略如图 4 所示,EVA 和其余购电商的市场出清结果见附录中图 A2。

从图 3 中可以看出,各种类型的 EV 用户采取的充电策略都是在可充电范围内使充电成本最低,理性用户没有偏离该充电策略的倾向。

对于 EVA 而言,由于其购电量数量级不及其他购电商,故其对日前出清电价的总体趋势的影响力较弱。由于 C 类 EV 用户占比较小,EVA 购买的电能大多分布在夜间常规负荷的低谷时段。由于市场的备用需求时段大多出现在白天负荷高峰期,EVA 竞标所得的备用电量集中在 C 类 EV 用户可充电的

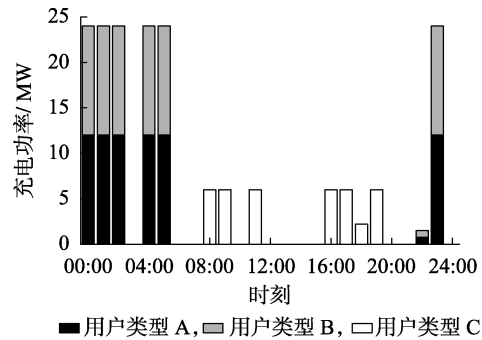


图 3 优化后 EV 的充电功率

Fig.3 EV charging power after optimization

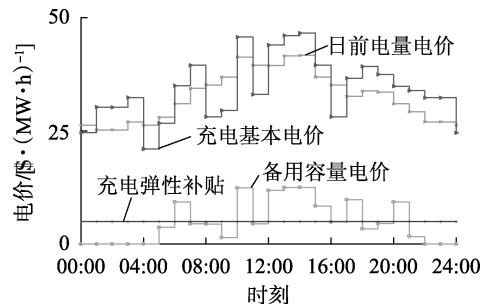


图 4 EVA 的竞价结果和定价策略

Fig.4 Bidding and pricing results of EVA

时段。充电基本电价的制定在日前出清电价的基础上波动,且波动幅度较大,这是因为 EVA 从自身利益出发,将市场风险转移给用户。由于充电弹性电价与时段无关,只与实际充电完成度和期望充电完成度之差有关,为 4.95 \$/(MW·h)。

各种场景下的充电基本电价如图 5 所示。市场收益和成本对比如表 2 所示,其中市场总成本为日前和实时购电成本与备用服务收益之差,EV 充电成本包含所有 EV 用户的充电费用与充电补贴之差。从图 5 可看出,Case 2 的平均充电电价较高,这是因为 Case 2 不参与备用市场,EVA 的收益只能从购、售电价差中获取,故 EVA 会提高可充电用户较多的时段的充电电价以最大化自身利润;Case 3 的充电电价波动程度较小,维持在分时电价附近,这是因为 Case 3 不参与市场竞价,其购电电价和备用电价固定且波动程度不大。

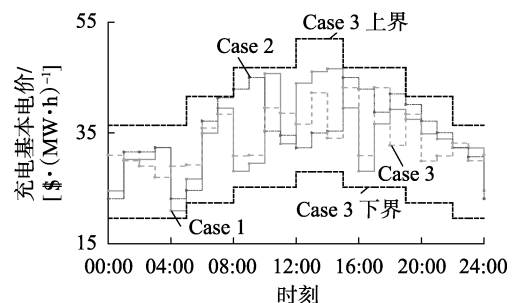


图 5 各种场景下的充电基本电价

Fig.5 Basic charging price in Case 1, 2 and 3

表 2 各个场景下的 EVA 收益对比

Table 2 Benefits of EVA in Case 1,2 and 3

场景	市场总成本	备用收益	EV 充电成本	EVA 收益
Case 1	4 624.8	2 005.3	5 057.4	432.5
Case 2	5 696.5	0	5 630.0	-66.5
Case 3	4 953.8	1 718.2	5 364.9	411.1

从市场收益来看,Case 1 的 EVA 收益最高,且 EV 的总充电成本最少,其主要原因是充电电价可以根据日前出清价格动态调整,同时竞标策略可以根据充电计划动态调整,使得参与日前市场的购电成本减小,而备用收益增加。Case 2 中,由于 EVA 不参与备用服务,故总市场成本增加,使得总收益为负,而 EV 也无法得到弹性补贴,因此总充电成本也较高;若此时 EV 不与 EVA 合作,直接用分时电价结算,则总充电成本为 \$ 5 899.2,比 Case 2 的充电成本更高,这是因为 EVA 定价策略是根据竞标结果和充电需求调整的,比分时电价更具灵活性。Case 3 虽然采用固定分时电价,但由于其向市场提供备用服务,使得市场总成本有所降低。从 3 种场景的结果对比可见,本文采用的联合优化模型可以提高系统的整体经济性,在增加 EVA 收益的同时降低 EV 的充电成本。

3.3 EV 用户类型对 EVA 最优策略的影响

当 EV 用户充电需求发生变动时,本文所提策略能够灵活变化,如不同的 EV 用户类型下,充电最优电价并不相同。当 EVA 的实际管辖区域发生变化时,如工作场所、商业场所和居民小区等,各 EV 用户类型所占比例也将改变。在不改变 EV 总数量的情况下,改变各类型 EV 用户所占的比例,设 Case 4 中 3 种 EV 用户的比例为 3:4:3,为考虑各种 EV 用户比例相似的情况,如工业园区 EVA;Case 5 考虑单一 EV 用户占主导的情况并且以白天充电用户为主,如管辖学校和写字楼等的 EVA,其用户比例为 1:1:8。将 Case 4、Case 5 与 Case 1 进行对比,优化求解后各种场景下的日前出清电价和充电基本电价分别见图 6 和图 7,EVA 的收益见表 3。

从图 6 可看出,因为 EV 负荷占整体负荷的比例较小,受其余购电商的购电总量影响,3 种情景下

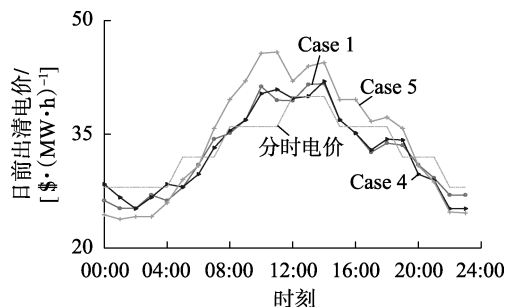


图 6 各种场景下的日前出清电价

Fig.6 Day-ahead clearing price in Case 1,4 and 5

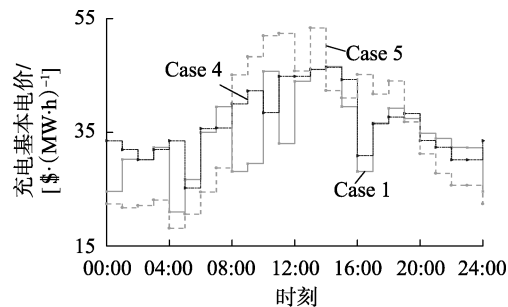


图 7 各种场景下的充电基本电价

Fig.7 Basic charging price in Case 1,4 and 5

表 3 各种场景下的 EVA 收益

Table 3 Benefits of EVA in Case 1,4 and 5

场景	市场总成本	EV 充电成本	EVA 收益	按 Case 1 充电电价的收益
Case 1	4 624.8	5 057.4	432.5	432.5
Case 4	4 932.5	5 878.8	946.2	915.2
Case 5	6 939.2	7 690.6	751.4	242.9

的日前市场出清电价的总体趋势相似。但当日间充电负荷占主导 (Case 5) 时,充电负荷进一步叠加到原有高峰负荷水平上,使得白天的电价进一步提升,尤其在时段 09:00—19:00 内。

由图 7 可知,当 C 类用户数量较多时 (Case 5),日间可充电负荷占 80%,且日间的市场出清电价比夜间高,故 EVA 制定的日间充电价格相比 Case 1 和 Case 4 高很多,尤其在时段 08:00—14:00 和 16:00—18:00,而夜间充电价格则低于 Case 1 和 Case 4,甚至低于市场出清电价。当 A 类和 B 类用户数量较多时 (Case 1),由于夜间的充电需求大,所以其夜间定价比 Case 5 高,且高于市场出清电价。当 3 种类型用户比例接近时 (Case 4),充电价格大致居于 Case 1 和 Case 5 之间,说明 EVA 会适当提升全时段整体的电价水平,包括夜间和白天高峰时段的电价。

为了验证灵活定价策略对 EVA 收益的影响,保持不同 EV 用户比例场景下的充电电价不变 (即采用 Case 1 的充电电价),将其与优化后的 EVA 收益进行比较,见表 3,可以看到,采用本文所提方法可以增加用户类型改变后 EVA 的收益,尤其是单一类型用户占主导时 (Case 5),EVA 可以将该类型用户的充电时段内的价格设置到满足约束时的最高值,使得收益的提升量尤为明显。当 3 种类型 EV 用户的比例接近时 (Case 4),由于整体充电价格水平的提高,而 EVA 从市场购电的出清电价变化不大,使得 EVA 的总收益最高。

4 结论

本文针对 EVA 在实际充电业务运营过程中的市场行为进行了分析,提出 EVA 的竞价和定价联合优化策略,基于主从博弈构造了 EVA 和 EV 用户的

双层优化模型。通过算例分析,比较了不同场景下EVA的收益和EV的充电成本,可以得到以下结论:

a. EVA参与日前市场竞价可以在一定程度上将市场风险转移给用户,同时EVA的竞价策略将对市场出清电价和备用容量电价产生影响,市场总成本和EV充电成本均小于价格接受者的场景;

b. EVA通过削减充电负荷参与备用辅助服务市场,可以增加EVA的收益,同时因为EV用户享受EVA给予的充电弹性补贴,能够在满足充电满意度的范围内降低充电成本;

c. EVA可以根据EV用户的充电需求动态调整竞价和定价策略,从而保证EVA的经济性。

此外,本文所提模型中未详细考虑市场其他竞争者的行为,在未来的研究中,可对其他竞标者的竞价博弈行为和市场均衡结果进行进一步建模分析。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委,国家能源局,工业和信息化部,等. 电动汽车充电基础设施发展指南(2015—2020年)[R]. 北京:国家能源局,2015.
- [2] 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.
- [3] 陈静鹏,朴龙健,艾芊. 基于改进贪心算法的大规模电动汽车充电行为优化[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):38-44.
CHEN Jingpeng, PIAO Longjian, AI Qian. Charging optimization based on improved greedy algorithm for massive EVs[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 38-44.
- [4] MA Z, CALLAWAY D S, HISKENS I A. Decentralized charging control of large populations of plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(1): 67-78.
- [5] ZHENG J, WANG X, MEN K, et al. Aggregation model-based optimization for electric vehicle charging strategy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 1058-1066.
- [6] 许少伦,严正,冯冬涵,等. 基于多智能体的电动汽车充电协同控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):7-13.
XU Shaolun, YAN Zheng, FENG Donghan, et al. Cooperative charging control strategy of electric vehicles based on multi-agent[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 7-13.
- [7] 王睨,谢鸣,张少华. 考虑电动汽车的电力市场均衡分析[J]. 电网技术,2014,38(11):2993-2998.
WANG Xian, XIE Ming, ZHANG Shaohua. Analysis on equilibrium of electricity market under grid-integration of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 2993-2998.
- [8] 李牧青,宋依群,严正,等. 电动汽车代理商的博弈竞争模型和算法研究[J]. 电网技术,2014,38(6):1512-1517.
LI Muqing, SONG Yiqun, YAN Zheng, et al. Research on game model and algorithm for electric vehicle aggregations[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1512-1517.
- [9] VAYA M G, ABDERSSON G. Optimal bidding strategy of a plug-in electric vehicle aggregator in day-ahead electricity markets under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2375-2385.
- [10] VAGROPOULOS S I, BAKIRTZIS A G. Optimal bidding strategy for electric vehicle aggregators in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4031-4041.
- [11] YANG H, ZHANG S, QIU J, et al. CVaR-constrained optimal bidding of electric vehicle aggregators in day-ahead and real-time markets[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(5): 2555-2565.
- [12] WU H, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. A game theoretic approach to risk-based optimal bidding strategies for electric vehicle aggregators in electricity markets with variable wind energy resources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 374-385.
- [13] 宫鑫,林涛,苏秉华. 电动汽车代理在电力市场的最优竞标策略[J]. 电网技术,2016,40(9):2596-2602.
GONG Xin, LIN Tao, SU Binghua. Optimal bidding strategy of an electric vehicle aggregator in electricity market[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2596-2602.
- [14] 李士动,施泉生,赵文会,等. 计及电动汽车接入电网的备用服务多目标竞价优化[J]. 电力系统自动化,2016,40(2):77-83.
LI Shidong, SHI Quansheng, ZHAO Wenhui, et al. A multi-objective optimization based bidding model with vehicle-to-grid reserve provision considered[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 77-83.
- [15] 潘樟惠,高赐威,刘顺桂. 基于需求侧放电竞价的电动汽车充放电调度研究[J]. 电网技术,2016,40(4):1140-1146.
PAN Zhanghui, GAO Ciwei, LIU Shungui. Research on charging and discharging dispatch of electric vehicles based on demand side discharge bidding[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1140-1146.
- [16] 魏犇,陈玥,刘锋,等. 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[J]. 电网技术,2015,39(4):939-945.
WEI Wei, CHEN Yue, LIU Feng, et al. Stackelberg game based retailer pricing scheme and EV charging management in smart residential area[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 939-945.
- [17] 王明深,于汀,穆云飞,等. 考虑用户参与度的电动汽车能效电厂模型[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):201-210.
WANG Mingshen, YU Ting, MU Yunfei, et al. Model of E-EPP considering participation factor of EV users[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 201-210.
- [18] 潘雄,罗春雷,徐国禹. 双侧开放市场中能量与备用容量的联合优化[J]. 电力系统自动化,2005,29(5):10-14.
PAN Xiong, LUO Chunlei, XU Guoyu. Optimal power flow based energy-reserve joint dispatch in the market open to both supply and demand sides[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(5): 10-14.
- [19] 王秀丽,周鹏,王锡凡. 发/供电公司市场均衡及竞价策略[J]. 电力系统自动化,2007,31(6):6-10.
WANG Xiuli, ZHOU Peng, WANG Xifan. Market equilibrium and bidding strategies of generation/distribution companies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(6): 6-10.
- [20] 袁智强,侯志俭,宋依群,等. 发电商不同策略的供应函数均衡分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2004,16(5):32-35.
YANG Zhiqiang, HOU Zhijian, SONG Yiqun, et al. Analysis of supply function equilibrium with different bidding strategy of suppliers[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2004, 16(5): 32-35.

作者简介:

杨思渊(1993—),女,浙江宁波人,硕士研究生,研究方向为电动汽车充电调度以及电力市场中的需求侧管理(**E-mail**: yangsiyuan1202@163.com);

姜子卿(1994—),男,山东潍坊人,博士研究生,研究方向为电力市场、需求响应、虚拟电厂(**E-mail**: jiangzq_jollay@sjtu.edu.cn);



杨思渊

艾 芊(1969—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为电力系统元件建模、电能质量、分布式发电、微电网(**E-mail**: aiqian@sjtu.edu.cn)。

Joint optimization of bidding and pricing strategy for electric vehicle aggregators considering reserve service

YANG Siyuan, JIANG Ziqing, AI Qian

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The emergence of EVAs (Electric Vehicle Aggregators) is expected to improve the problems on interactive power supply between the power grid and large-scale electric vehicles. The EVAs are taken as the research objects to analyze their market behaviors of electricity purchasing and selling in the operation process. Then the joint optimization method of bidding and pricing strategy considering the participation in the reserve service market is proposed to enhance the economic benefits of the aggregators and reduce the cost of charging fees for electric vehicles. Based on the unified clearing model of the day-ahead energy market and reserve service market and considering the Stackelberg game between the EVAs and the electric vehicle owners, a bi-level optimization model of EVA bidding and pricing strategy is proposed. Consequently, the optimal bidding strategy of EVAs in the day-ahead energy market and the setting strategy of charging fees are obtained. The validity of the proposed model and the economy and flexibility of the proposed strategy are verified by the analysis of an example.

Key words: electric vehicles; electric vehicle aggregators; bidding strategy; pricing strategy; bi-level optimization; reserve service; joint optimization

(上接第15页 continued from page 15)

Dynamic current limiting strategy of electric vehicle inverters based on real-time junction temperature observation

LIU Ping¹, ZHANG Xing¹, HUANG Shoudao¹, YIN Shuhu²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan VicRuns Electric Co., Ltd., Xiangtan 411100, China)

Abstract: Aiming at the problem that the too high real-time junction temperature of power module in the EV (Electric Vehicle) inverter may cause the device and even the system to break out, the dynamic current limiting control strategy of EV inverters based on the real-time junction temperature observation feedback is proposed. The electro-thermal model of IGBT (Insulated-Gate-Bipolar Transistor) is established to online observe the real-time maximum junction temperature of all IGBT chips and FWD (Fly-Wheel Diode) chips in the power module. Then, the thermal state and the maximum available heat capacity of the devices are imported to the current limiting controller to obtain the maximum operation current of the inverter, which realizes the dynamic current limiting control of the EV inverters. Simulative results show that the proposed strategy enables the inverter to operate safely within the maximum available junction temperature range, and it can also maximize the limit of operation performance for the inverter and improve the power density and reliability of the system.

Key words: electric vehicles; electric inverters; junction temperature observation; heat capacity; current limiting; reliability; control strategy

附录

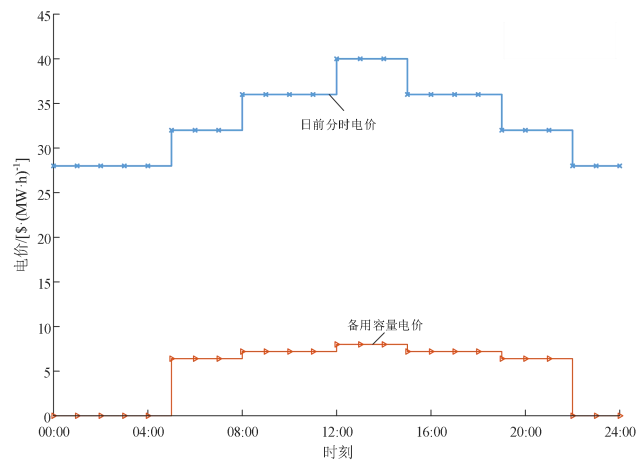


图 A1 日前分时电价和备用容量电价

Fig.A1 Day-ahead time-of-use electricity price and reserve capacity price

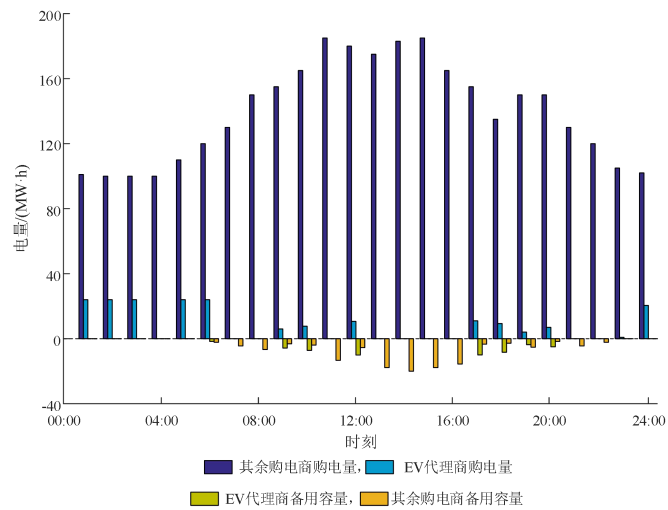


图 A2 Case 1 下 EVA 和其余购电商市场出清结果

Fig.A2 Market clearing results of EVA and other power purchaser in Case 1