

# V2G辅助服务调节潜力与经济性分析:以上海地区为例

周椿奇<sup>1</sup>, 向月<sup>1</sup>, 张新<sup>2</sup>, 张沈习<sup>3</sup>, 刘友波<sup>1</sup>, 刘俊勇<sup>1</sup>, 胡帅<sup>4</sup>

(1. 四川大学电气工程学院, 四川成都 610065; 2. 英国克兰菲尔德大学水-能源-环境学院, 英国贝德福德郡 MK43 0AL; 3. 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240; 4. 国网宁夏电力有限公司经济技术研究院, 宁夏银川 750004)

**摘要:**电动汽车(EV)在我国快速发展和规模化应用,为开展利用车入网(V2G)技术调控集群EV参与电力辅助服务提供了基础。在建立计及V2G技术参与辅助服务的EV充放电经济调控模型的基础上,采用上海地区相关统计数据,分析集群EV参与电力辅助服务的调节能力与潜在经济价值以及EV规模化发展带来的环境效益。仿真结果表明:集群EV参与辅助服务能够在降低用户成本的同时,为当地电网提供削峰填谷服务,且EV规模化发展可有效减少当地的CO<sub>2</sub>排放量;进一步分析发现EV充放电功率、峰谷电价比例的增大以及电池成本的下降将增加V2G应用的经济效益。

**关键词:**电动汽车;V2G;辅助服务;调节能力;经济性;环境效益

**中图分类号:**U 469.72

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202104007

## 0 引言

电动汽车(EV)作为我国绿色可持续发展战略中的重要举措之一,正受到国家和社会各界的广泛关注。此前,国务院明确将《新能源汽车推广应用财政支持政策方案》<sup>[1]</sup>中的相关补贴政策继续延长两年,为EV的进一步发展普及提供了有力的保障。但考虑到大规模集群EV入网的物理本质在于电储能耦合,在其接入电网后能够借助于车入网(V2G)技术提供一定的辅助服务。2020年,我国华北地区将V2G充电桩资源正式纳入部分地区的电力调峰辅助服务市场并进行结算<sup>[2]</sup>,反映了应用V2G技术参与电力辅助服务的现实可行性和实际需求。

单一EV的容量往往较小,因此V2G技术一般需要通过集群EV代理商对已入网的集群EV实施充放电调控管理,使得EV在电价低谷时段购入更多的电量,在电价高峰时段将多余的电量出售给电网,从而获取一定的价差收益<sup>[3]</sup>。此外,考虑到在绝大多数时段内EV都处于停靠状态,因此集群EV代理商还可以利用这一部分闲置的可调度资源参与电力辅助服务,从而进一步提高EV用户的收益。文献[4]将集群EV作为储能设备,提出了一种集群EV为电力系统提供调频辅助服务的控制策略;文献[5]对EV作为储能设备可提供的弹性储能容量进行了探索;文献[6]对集群EV与家庭互动(V2H)调度策略的适用性进行了分析;文献[7]研究了V2G模式下

EV的有序充放电控制模型;文献[8]指出EV可提供旋转备用容量,从而为用户争取经济收益。

上述研究侧重于分析代理商的优化调控策略,未对EV参与辅助服务的潜在综合价值展开讨论,如文献[9]仅从充电经济性角度对EV充电桩进行规划,未体现V2G技术的优势。关于V2G技术的研究,文献[10]对比了EV参与调频辅助服务与提供旋转备用容量的经济效益,得到参与调频辅助服务的EV具有更高经济效益的结论;文献[11]分析了EV提供调峰辅助服务的经济性,但未能最大限度地发挥EV提供电力辅助服务的经济性;文献[12-13]利用蒙特卡洛模拟方法对EV个体用户驾驶行为习惯的随机性进行模拟,得到各时刻EV停靠数量、连接数量、断开数量的分布。但上述研究缺少我国当前阶段实际EV历史统计数据的支撑,大多采用国外已有的燃油汽车的统计数据或采用仿真数据进行分析。

因此,为了更加真实、准确地分析符合我国国情和市场特征的V2G技术应用的潜在价值以及EV规模化发展带来的环境效益,本文以上海地区为例,依托EV用户行为习惯的收集方法与分析结果<sup>[14]</sup>,将其作为本文用户行为的实验数据。构建计及V2G参与辅助服务的EV充电计划经济调控模型,根据上海市EV充电相关电价数据及国内外电力辅助服务相关政策规定,推算得到EV用户的最低总支出以及为电网减少的峰谷负荷差值,并进一步对EV规模化发展带来的环境效益进行分析,以此探讨利用V2G技术参与辅助服务的调节能力及其经济可行性。

## 1 集群EV充放电调控

基于集群EV代理商与电网进行灵活互动的模式,在满足用户行为习惯以及用户需求的条件下,建

收稿日期:2020-10-30;修回日期:2021-02-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807127);四川省科技计划项目(20SYSX0233)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51807127) and the Science and Technology Program of Sichuan Province(20SYSX0233)

立线性规划方法对EV用户的最低总支出进行求解。其中,EV用户借助V2G技术可能获得的收益包括:①集群EV作为储能设备通过“低价买电,高价卖电”模式获得的能源套利收益(即调峰收益);②参与调频辅助服务获得的调频补偿收益;③在负荷低谷时段进行充电调度获得的填谷补偿收益。

本文讨论集群EV利用V2G技术进行充放电调度的同时参与辅助服务从而使得EV用户的总支出最低,以此反映V2G技术的经济性(调度控制周期为1d,以1h为间隔分为24个时段)。集群EV代理商的充放电调度控制框图见图1。输入用户侧、电网侧的相关参数,通过代理商统一进行集群EV的充放电电量调度,得到各时段经济最优的充放电电量、参与辅助服务的电量,从而反映集群EV利用V2G技术参与辅助服务的最大潜在价值。用户侧的输入参数包括一天中各时段处于连接状态的EV数量 $N^{\text{Total}}$ 、处于断开状态的EV数量 $N^{\text{D}}$ 、新接入的EV数量 $N^{\text{C}}$ 以及放电过程中的电池损耗成本;电网侧的输入参数包括一天中各时段的充放电电价(为了更加公平地促进EV用户参与V2G互动模式中,规定各时段的充电电价与放电电价相等)、EV参与辅助服务的调频单价以及参与调峰服务的填谷补偿单价。

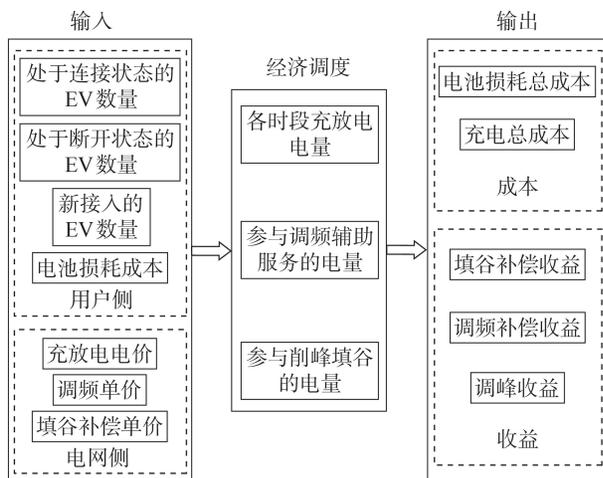


图1 EV充放电调度控制框图

Fig.1 Block diagram of charging and discharging dispatch control of EV

计及充放电过程中的各种安全或需求约束条件,通过集群EV代理商利用V2G技术参与调频、调峰辅助服务对EV进行充放电最优经济调度,确定各时段的最优充放电调度电量以及各时段利用V2G技术参与电力辅助服务的额外收益值。

## 2 集群EV参与电力辅助服务

相较于传统的发电机组,EV作为储能在参与调频、调峰辅助服务时具有更加快速的调节响应速度以及更高的调节效率。由于集群EV在一天中的大

部分时段都处于停靠状态,利用EV的储能性质,引导其参与电力辅助服务获得额外收益,可以降低EV用户的充电成本。

### 2.1 集群EV参与辅助服务方式

集群EV提供调频辅助服务的模式包括向电力系统放电的向上调频、对EV充电的向下调频2种。EV参与调频辅助服务的方式如图2所示,其中EV调频容量参考文献[10]中的方式,主要由代理商可调度EV的容量决定。图中, $e(t-1)$ 、 $e(t)$ 分别为 $t-1$ 、 $t$ 时段代理商中EV的可调度电量; $c(t)$ 、 $d(t)$ 分别为 $t$ 时段的充电、放电电量; $f^{\text{up}}(t)$ 、 $f^{\text{down}}(t)$ 分别为 $t$ 时段代理商可调度的最大向上调频电量、最大向下调频电量。同时,为了避免各时段EV额外向电网购电/售电而造成代理商的总电量过剩/不足的情况发生,本文近似认为在一天中的向上调频电量与向下调频电量保持相等<sup>[10]</sup>,并假设实验中的EV在各时段均可以向电网提供调频辅助服务而获得收益。

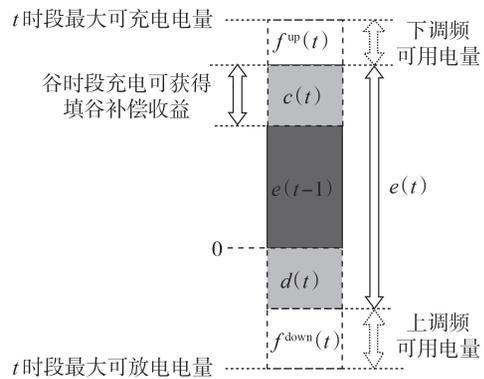


图2 EV参与调频辅助服务的方式

Fig.2 Participation mode of EV in frequency regulation ancillary service

关于EV参与提供调峰辅助服务,参考文献[15]中储能参与调峰辅助服务的方式以及补偿机制,定义本文中EV参与调峰辅助服务的方式为:在用电负荷高峰时段EV反向放电,利用峰谷价差获得调峰收益;在用电负荷低谷时段EV进行充电,获得在负荷低谷时段进行充电的额外补偿收益。

### 2.2 集群EV参与辅助服务的目标函数

如前文所述,EV用户可获得的收益包括EV作为储能获得的反向放电收益、处于停靠状态的EV参与调频辅助服务获得的补偿收益以及参与调峰辅助服务获得的补偿收益3个部分,故集群EV参与辅助服务的目标函数为:

$$\min G = \sum_{t=1}^T (M_c(t) + C_b(t) - R_f(t) - R_p(t)) \quad (1)$$

$$M_c(t) = c(t) \phi_c^{\text{elec}}(t) \quad (2)$$

$$C_b(t) = P_b(d(t) \eta^{\text{D}} + 0.5 f^{\text{up}}(t)) \quad (3)$$

$$R_f(t) = \frac{1}{2} f^{\text{up}}(t) \phi_f^{\text{up}}(t) + \frac{1}{2} f^{\text{down}}(t) \phi_f^{\text{down}}(t) \quad (4)$$

$$R_p(t) = c^{\text{through}}(t)\phi^{\text{through}} + d(t)\phi_d^{\text{elec}}(t) \quad t \in T^* \quad (5)$$

其中,  $G$  为 EV 用户一天的总支出;  $T$  为调度周期的时段总数, 本文中为 24;  $M_c(t)$  为  $t$  时段的充电电量支出;  $C_b(t)$  为  $t$  时段 EV 的电池损耗成本;  $R_f(t)$  为  $t$  时段 EV 参与调频辅助服务的补偿收益, 且假设各时段集群 EV 均可参与调频辅助服务而获得收益;  $R_p(t)$  为  $t$  时段 EV 参与调峰辅助服务的补偿收益;  $\phi_c^{\text{elec}}(t)$  为  $t$  时段的充电电价;  $P_b$  为放电过程单位功率的电池损耗成本 (EV 的放电过程常为浅度慢速放电, 对电池寿命的影响很小<sup>[10]</sup>);  $\eta^D$  为 EV 电池的放电效率;  $\phi_f^{\text{up}}(t)$ 、 $\phi_f^{\text{down}}(t)$  分别为  $t$  时段上调频、下调频容量电价;  $T^*$  为一天内的负荷峰谷时段;  $c^{\text{through}}(t)$  为在负荷低谷  $t$  时段的充电电量;  $\phi^{\text{through}}$  为谷时段的填谷补偿单价;  $\phi_d^{\text{elec}}(t)$  为  $t$  时段的放电电价。

### 2.3 集群 EV 参与辅助服务的约束条件

#### 1) EV 用户的充电需求约束。

定义集群 EV 在  $t$  时段的可调度容量  $E(t)$  以及充放电功率  $P(t)$  取决于  $t$  时段处于连接状态的 EV 数量  $N^{\text{Total}}(t)$ , 即:

$$E(t) = B^e N^{\text{Total}}(t) \quad (6)$$

$$P(t) = B^p N^{\text{Total}}(t) \quad (7)$$

其中,  $B^e$ 、 $B^p$  分别为单辆 EV 的电池容量、充放电功率。

为了保证满足 EV 用户出行的能量需求, 引入约束式(8)以确保代理商有足够的能量满足  $t$  时段处于断开状态的 EV 用户的驾车需求; 同时, 当 EV 参与调频辅助服务时,  $t$  时段的可调度电量不能低于该时段处于断开状态的 EV 用户的需求电量, 如式(9)所示。

$$E(t) \geq N^D(t) B^e S_{\text{soc}}^{\text{dep}} \quad (8)$$

$$e(t-1) + c(t)\eta^c - d(t)\eta^D - f^{\text{up}}(t) \geq N^D(t) B^e S_{\text{soc}}^{\text{dep}} \quad (9)$$

其中,  $N^D(t)$  为  $t$  时段处于断开状态的 EV 数量;  $\eta^c$  为 EV 电池的充电效率;  $S_{\text{soc}}^{\text{dep}}$  为 EV 断开连接时电池的荷电状态。

#### 2) 集群 EV 总容量平衡约束。

集群 EV 作为储能装置, 其在各时段的总容量需满足:

$$e(t) = \begin{cases} e(t-1) + c(t)\eta^c - d(t)\eta^D + \\ N^c(t) B^e S_{\text{soc}}^{\text{ini}} - N^D(t) B^e S_{\text{soc}}^{\text{dep}} & t = 2, 3, \dots, 24 \\ e_0 + c(t)\eta^c - d(t)\eta^D + \\ N^c(t) B^e S_{\text{soc}}^{\text{ini}} - N^D(t) B^e S_{\text{soc}}^{\text{dep}} & t = 1 \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $e_0$  为初始时刻处于连接状态的 EV 总容量;  $S_{\text{soc}}^{\text{ini}}$  为 EV 进行充电时电池的荷电状态。

#### 3) EV 充放电功率约束。

EV 在  $t$  时段参与经济最优调度以及参与辅助服务的功率传输约束为:

$$c(t) - d(t) + f^{\text{down}}(t) \leq P(t) \quad (11)$$

$$d(t) - c(t) + f^{\text{up}}(t) \leq P(t) \quad (12)$$

#### 4) EV 参与调频辅助服务的容量约束。

当 EV 参与调频时, 需保证各时段参与调频的容量 (向上或向下调频容量) 不超过代理商中 EV 的总电量, 即:

$$(1 - D_{\text{DOD}}^{\text{max}}) E_i \leq e(t-1) + c(t) - d(t) - f^{\text{up}}(t) \leq S_{\text{soc}}^{\text{max}} E_i \quad (13)$$

$$(1 - D_{\text{DOD}}^{\text{max}}) E_i \leq e(t-1) + c(t) - d(t) + f^{\text{down}}(t) \leq S_{\text{soc}}^{\text{max}} E_i \quad (14)$$

其中,  $D_{\text{DOD}}^{\text{max}}$  为 EV 电池的最大放电深度, 本文中为 80%;  $S_{\text{soc}}^{\text{max}}$  为 EV 电池荷电状态的最大值, 取值为 100%。

由此, 基于式(1)~(14)构建考虑 EV 参与辅助服务的充放电经济调度模型, 并借助常用的优化求解器 CPLEX 对该线性规划问题进行快速求解。

此外, 基于上文对 V2G 技术的探索及国家对购买 EV 的政策红利可知, 未来 EV 的规模化发展势必会带来巨大的环境效益。本文以上海市所属华东地区为例, 参考文献[16]中所提 2018 年华东地区的火力发电占比、文献[17]中对燃油汽车与 EV 所产生 CO<sub>2</sub> 排放量的研究, 根据上文所求上海市 EV 的日耗电量, 采用文献[18]中 CO<sub>2</sub> 排放量的计算方法, 对比上海市由火电机组生产 EV 用户所需电量而产生的 CO<sub>2</sub> 排放量与燃油汽车行驶相同的距离所产生的 CO<sub>2</sub> 排放量, 计算模型见附录 A 式(A1)~(A4)。

## 3 算例分析

### 3.1 基础数据

以上海地区为例, 对 EV 用户借助 V2G 技术参与辅助服务的经济性进行仿真分析。根据上海地区某日 2 种类型 EV (电动私家车和电动公务车) 的用户行为跟踪统计数据 (各时段的停靠数量以及处于连接状态、断开状态的 EV 数量)<sup>[14, 19]</sup>, 按一定的比例扩展得到区域所有电动私家车、电动公务车在各时段的行为参数, 如附录 B 表 B1 所示。

文献[20]中对储能设备参与调频辅助服务的定价机制有如下规定: 储能参与调频辅助服务的补偿单价主要由 4 组调频效果的表征系数 (响应自动发电控制 (AGC) 指令的速率、响应 AGC 指令的时间延迟、响应 AGC 指令而产生的误差精度、综合指标) 统一决定。由于无法直接获取目前国内对于储能参与调频辅助服务补偿单价的相关内容, 本文对比了上海地区调频补偿电价的报价范围与国外辅助服务市场的调频单价, 发现美国 PJM 市场的调频单价与目前华东区域的调频报价范围有相似性, 因此将美国 PJM 市场中的调频单价<sup>[21]</sup>作为本文中 EV 参与调频辅助服务的补偿单价, 具体见附录 B 表 B2。而关于调峰辅助服务, 由于上海地区储能参与调峰辅助服务的模式尚未成熟, 本文参考文献[15]将 EV 参与调峰辅助服务的补偿单价设定为 0.05 万元 / MW。

此外, 上海地区 EV 的充电分时电价<sup>[14]</sup>见附录 B 表 B3; 从 EV 用户购买经济性出发, 选取电动私家车车型为日产启程凌风 (电池容量为 24 kW·h), 电动

公务车车型为北汽EV 200(电池容量为 $30\text{ kW}\cdot\text{h}$ );根据上海地区现有充电桩的充电功率调查结果,取每辆EV的充放电功率为 $7\text{ kW}$ <sup>[19]</sup>;参考地区储能参与调峰辅助服务的有关政策<sup>[2]</sup>,规定EV参与调峰辅助服务时的充电行为可获得填谷补偿,时段为22:00至次日06:00;EV在单位小时内可参与调频辅助服务的时长设为0.5 h;新接入EV的电池初始荷电状态取 $[0.1, 0.5]$ 范围内的随机数,断开连接状态的EV电池的最终荷电状态取 $[0.9, 1]$ 范围内的随机数;其余相关参数见附录B表B4。

### 3.2 V2G仿真分析

#### 1) 集群EV参与调峰辅助服务结果。

根据文献[11]中提供的上海市某日负荷用电数据,基于本文所提模型对上海市集群EV参与辅助服务进行仿真计算,得到集群EV参与调峰辅助服务前、后的负荷曲线如图3所示。

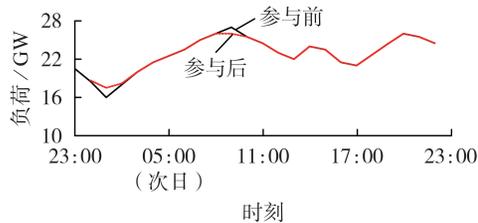


图3 集群EV参与调峰前、后的负荷曲线

Fig.3 Load curves before and after cluster EVs' participation in peak load regulation

集群EV参与调峰辅助服务,在22:00至次日06:00的负荷低谷时段通过控制集群EV充电,可为上海地区提供 $2100\text{ MW}\cdot\text{h}$ 左右的填谷电量;在负荷高峰时段控制集群EV放电,可削减 $1600\text{ MW}\cdot\text{h}$ 左右的高峰负荷。可见,对上海地区的集群EV进行合理的充放电调度每日可降低 $3700\text{ MW}\cdot\text{h}$ 左右的峰谷负荷差值。随着国家对新能源汽车的大力推广,大规模EV接入上海电网后,集群EV利用V2G技术参与调峰填谷的效果将更加明显。根据文献[14]中所提上海市年负荷平均增长率为0.7%及巴斯扩散模型(见附录B式(B1)),分别对上海市2025年以及2030年的日均负荷及EV数量进行预测,然后根据本文所建模型可得到2025年及2030年大规模EV接入对电网起到的削峰填谷效果,结果如图4所示。

由图4可以看出,随着上海市EV的大规模发展,利用本文所建模型可为电网未来的运行稳定性提供一定的保证;基于本文所建模型,2025年82万辆集群EV、2030年155万辆集群EV可分别调节 $11500$ 、 $21000\text{ MW}\cdot\text{h}$ 左右的峰谷负荷差值,可见随着EV的规模逐渐扩大,集群EV主动参与辅助服务可为当地电网的安全稳定运行起到一定的积极作用。此外,由仿真结果也可预知,当上海市EV达到

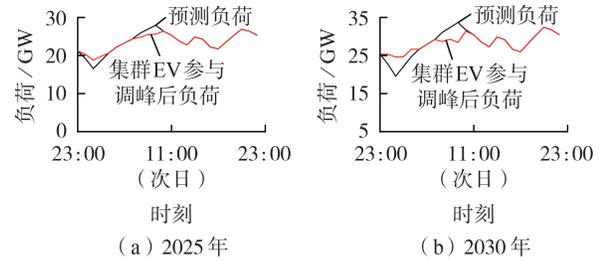


图4 2025年与2030年集群EV参与调峰的效果

Fig.4 Peak load regulation effect of cluster EVs in 2025 and 2030

一定的数量时,会出现削峰填谷的饱和状态,大规模EV接入会造成新的负荷峰值问题,该情形下的充放电调度问题有待进一步深入探究。

#### 2) 集群EV参与调频服务结果。

根据2.1节所述参与调频辅助服务的规则,根据本文所建模型得到集群EV参与调频辅助服务可提供的向上、向下调频功率,如图5所示。

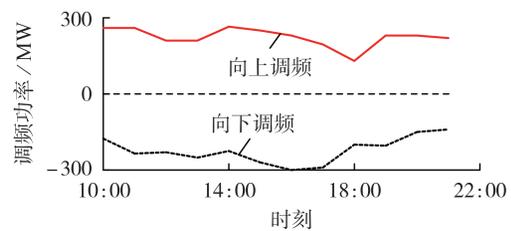


图5 集群EV可提供的调频功率

Fig.5 Available frequency regulation power of cluster EVs

由图5可知,以现阶段上海市EV保有量的规模参与调频辅助服务,在1 h内能提供的最大向上、向下调频电量分别约为 $305$ 、 $270\text{ MW}\cdot\text{h}$ 。考虑到至2025年及2030年,EV规模会进一步扩大,可提供的调频电量可能将远大于电网的需求量,此时集群EV参与调频辅助服务的电量有待进一步探索与研究。

#### 3) 集群EV用户的收益与支出。

从用户角度来看,本文所提模型可为不同EV用户节省的充电支出也是推进EV规模化发展的重要因素。一天内上海市电动私家车用户利用V2G技术参与辅助服务的收益、支出结果见图6。由图可

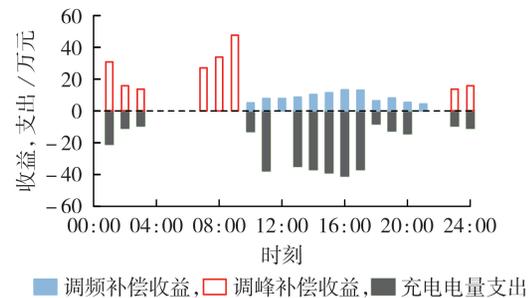


图6 电动私家车用户的收益、支出结果

Fig.6 Revenue and expense results of electric private car users

知,在 00:00—09:00、23:00—24:00 时段内利用集群 EV 作为储能设备参与调峰辅助服务获得收益;在其他时段利用处于停靠状态 EV 的可调度电量参与调频辅助服务获得收益。

一天内上海市电动私家车用户在不同充电模式下的收益、支出结果见图 7,其中无序充电模式和 V2G 充电模式采用 3.1 节中的用户行为数据,有序充电模式利用文献[14]中的上海市有序充电调研结果。由图可知,在无序充电模式下,根据“即连即充”的特点计算得到 EV 用户的总支出约为 268 万元;在有序充电模式下,根据既定 EV 充电负荷及其分布得到 EV 用户的总支出约为 196 万元;在 V2G 充电模式下, EV 用户的总支出约为 85 万元。可见,上海市电动私家车利用 V2G 技术参与辅助服务不仅能够为上海地区的日均负荷起到削峰填谷的作用,还能因参与相关辅助服务而获得补偿,为 EV 用户节省了约 68% 的支出(相较于无序充电模式)。

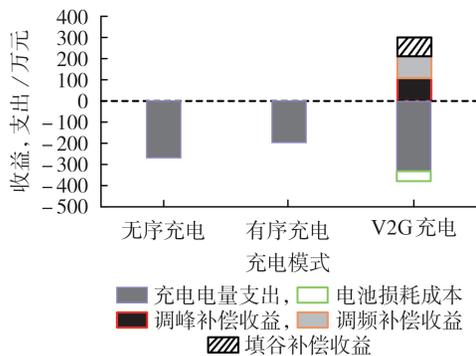


图 7 不同充电模式下电动私家车用户的收益、支出结果

Fig.7 Revenue and expense results of electric private car users under different charging modes

上海市电动公交车每日利用 V2G 技术参与辅助服务的收益、支出结果见附录 B 图 B1。相较于电动私家车,电动公交车在 08:00—19:00 的工作时段使用更为频繁,因此图 B1 中可看出电动公交车参与调频辅助服务的平均收益低于电动私家车;但在调峰辅助服务方面,由于电动公交车在夜间的充电需求电量更大(在白天的充电需求量较小),每辆电动公交车参与调峰辅助服务的平均收益稍高于电动私家车。

上海市电动公交车在不同充电模式下的收益、支出结果见附录 B 图 B2。由图可知,在无序充电模式、有序充电模式、V2G 充电模式下电动公交车的总支出分别约为 72、49.5、28.5 万元,可见相较于无序充电模式,V2G 充电模式可为电动公交车用户节省约 60% 的支出。

由上述结果可知:上海地区的电动私家车参与调频辅助服务的平均收益高于电动公交车参与调频辅助服务的平均收益,而电动公交车参与调峰的平均收益明显高于电动私家车。电动私家车、电动公

务车在不同充电模式下的平均充电成本见表 1。

表 1 不同充电模式下 EV 的平均充电成本

Table 1 Average charging cost of EVs under different charging modes

| 充电模式   | 平均充电成本 / 元 |       |
|--------|------------|-------|
|        | 电动私家车      | 电动公交车 |
| 无序充电   | 15.5       | 14.6  |
| 有序充电   | 11.4       | 10.1  |
| V2G 充电 | 4.7        | 5.8   |

#### 4) V2G 参与辅助服务的经济性灵敏度分析。

V2G 参与辅助服务的影响因素主要为充电速率、充放电电价以及电池损耗成本等。本文考虑这 3 个影响因素,改变上海市电动私家车的相关参数以对比分析 EV 用户的支出情况。

##### (1) 充电功率对经济性的影响。

不同充电功率下电动私家车用户的充电电量支出见图 8。由图可知,在无序充电模式下,充电功率的提高导致 EV 充电更容易发生在电价较高时段,从而增大了用户的充电电量支出;在有序充电模式下, EV 用户更多地选择电价低谷时段充电,直接导致用户的充电电量支出降低;而在 V2G 充电模式下, EV 用户的充电电量支出降低得更多,当充电功率由 7 kW 分别提升至 11、15 kW 时, EV 用户的充电电量支出分别降低了 11.2%、15%。这是因为充电功率的提高使集群 EV 可提供的调频电量增加,从而增加了调频补偿收益。另外值得注意的是,由于集群 EV 参与辅助服务在实际情况中更适合发生在慢速充电模式下,因此本文暂未考虑更大充电功率的情形。

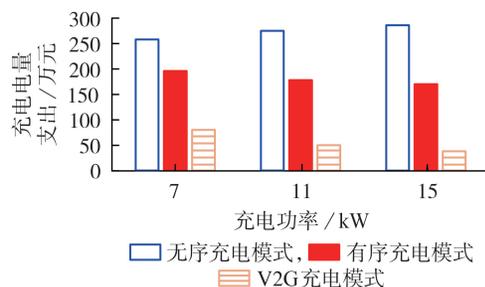


图 8 不同充电功率下的充电电量支出

Fig.8 Charging expenses under different charging powers

##### (2) 峰谷电价比对经济性的影响。

峰谷电价比变为 3:1 及 6:1 时电动私家车用户的充电电量支出结果见附录 B 图 B3。由图可知,在无序充电模式下, EV 充电电价的提高直接导致 EV 用户充电电量支出增加;在有序充电模式下,随着峰谷电价比的提高, EV 用户的充电电量支出有明显的下降;而在利用 V2G 技术参与辅助服务的充电模式下, EV 用户充电电量支出减少更明显,峰谷电价比分别扩大至 3:1、6:1 时,能分别为用户节省约 5%、12% 的支出。这是因为更大的峰谷电价差增加了

EV作为储能设备反向放电的收益,从而使用户获得更多的调峰补偿收益。鉴于此,通过比较不同峰谷电价比下的结果,相关部门可考虑调节峰谷电价比以推进EV的规模化发展。

(3) 电池损耗成本对经济性的影响。

当电池损耗成本分别下降80%、50%时对EV用户充电电量支出的影响结果见附录B图B4。由图可知,由于无序充电与有序充电模式下均不存在放电情况,电池损耗成本的下降对这2种充电模式下EV用户的充电电量支出没有影响;而在V2G充电模式下,电池损耗成本下降80%、50%时能分别为EV用户节省约3%、8.9%的支出。

5) 集群EV的环境效益。

上海市EV规模化推广会提高该市燃油汽车向EV的转化率。根据上文所提EV环境效益模型,对EV规模化发展的城市环境保护效益进行分析。附录B图B5对比了行驶相同距离的情况下,因火电机组生产EV充电电量所排放的CO<sub>2</sub>与燃油汽车的CO<sub>2</sub>排放量。由结果可知:随着EV逐步替代燃油汽车,现有规模的EV每年可为上海市减少1836 t的CO<sub>2</sub>排放量;根据前文对EV规模的预测结果,可推测至2025年和2030年,每年可减少的CO<sub>2</sub>排放量分别为5700、10000 t。

此外,根据现阶段国家对清洁能源优先消纳的原则,为了更实际地反映EV规模化发展带来的环境效益,根据2019年华东地区火电机组发电占比的减少率<sup>[22]</sup>结果,进一步推算得到2025年及2030年火电机组的发电占比,估计结果如图9所示。

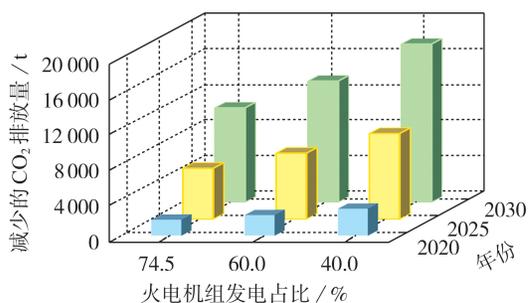


图9 EV规模化发展减少的CO<sub>2</sub>排放量

Fig.9 Reduction of CO<sub>2</sub> emission with large-scale development of EVs

由图9可知,当华东地区的火电机组发电占比降低至40%时,EV能减少约3076 t的CO<sub>2</sub>排放量(相较于同等规模下的燃油汽车);随着EV数量增长至150万辆,相较于燃油汽车,EV能为上海市减少约17837 t的CO<sub>2</sub>排放量。综上可知,从城市环保角度来看,量化EV带来的环境效益能为EV的规模化推广提供有力的支撑。

## 4 结论

本文对上海地区EV参与电力辅助服务的潜在价值进行了分析,采用上海地区的EV用户行为习惯统计数据,构建了以EV用户最低支出为目标的集群EV优化调控模型。通过仿真分析得到如下结论:

1) 借助V2G技术,集群EV能够降低地区峰谷负荷差值,且随着EV规模化发展,V2G模式的调峰效果会更加明显;

2) 借助V2G技术,通过合理调控集群EV参与调频、调峰辅助服务,集群EV能够获得可观的辅助服务经济收益;

3) 提高电池的充电功率、增大峰谷电价比、降低电池损耗成本会增加V2G应用的经济效益;

4) 推算可得现阶段上海市EV的保有量能够大量减少CO<sub>2</sub>排放量,且随着该地区EV规模化发展以及火电机组发电比例的下降,会带来更加可观的低碳环境效益。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 国家发展改革委. 新能源汽车推广应用财政支持政策方案[EB/OL]. (2020-04-23)[2020-05-30]. [http://www.gov.cn/zhen-gce/zhengceku/2020-04/23/content\\_5505502.htm](http://www.gov.cn/zhen-gce/zhengceku/2020-04/23/content_5505502.htm).
- [2] 中国能源网. 华北将V2G充电桩资源正式纳入电力调峰辅助服务市场并结算[EB/OL]. (2020-04-23)[2020-05-30]. [http://www.cnenergy.org/csn/202004/t20200423\\_762491.html](http://www.cnenergy.org/csn/202004/t20200423_762491.html).
- [3] 刘晓飞. 电动汽车V2G系统及充放电控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
LIU Xiaofei. Research on electric vehicle V2G system and charging and discharging control strategy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [4] 杨健维,董鸿志,廖凯,等. 计及电动汽车辅助调频的负荷频率控制联合优化[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 200-206.  
YANG Jianwei, DONG Hongzhi, LIAO Kai, et al. Joint optimization of load frequency control considering auxiliary frequency regulation of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 200-206.
- [5] DENG R Q, XIANG Y, HUO D, et al. Exploring flexibility of electric vehicle aggregators as energy reserve[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 184: 106305.
- [6] 邢紫佩,王守相,梅晓辉,等. 考虑电动汽车充放电全程功率变化率和用户舒适度的V2H调度策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 70-76.  
XING Zipei, WANG Shouxiang, MEI Xiaohui, et al. V2H scheduling strategy considering charging and discharging power change rate of electric vehicles and users' comfort level[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 70-76.
- [7] 陈忠华,王才倩,陈嘉敏,等. V2G模式下的电动汽车有序充放电控制模型研究[J]. 浙江电力, 2019, 38(8): 37-42.  
CHEN Zhonghua, WANG Caiqian, CHEN Jiamin, et al. Study on coordinated charging and discharging control model of electric vehicles under V2G mode[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(8): 37-42.
- [8] 吴巨爱,薛禹胜,谢东亮. 电动汽车聚合商对备用服务能力的优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 75-81.

- WU Juai, XUE Yusheng, XIE Dongliang. Optimization of reserve service capability made by electric vehicle aggregator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 75-81.
- [9] XIANG Y, LIU J Y, LI R, et al. Economic planning of electric vehicle charging stations considering traffic constraints and load profile templates [J]. Applied Energy, 2016, 178: 647-659.
- [10] 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, 58.
- LU Lingrong, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Economic analysis of ancillary service provision by plug-in electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 43-49, 58.
- [11] LI X Z, TAN Y T, LIU X X, et al. A cost-benefit analysis of V2G electric vehicles supporting peak shaving in Shanghai [J]. Electric Power Systems Research, 2020, 179: 106058.
- [12] MEENAKUMAR P, AUNEDI M, STRBAC G. Optimal business case for provision of grid services through EVs with V2G capabilities [C] // 2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVRE). Monte Carlo, Monaco: IEEE, 2020: 1-10.
- [13] 陈立兴, 黄学良. 高速公路充电站电动汽车有序充电策略 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 112-117, 126.
- CHEN Lixing, HUANG Xueliang. Ordered charging strategy of electric vehicles at charging station on highway [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 112-117, 126.
- [14] 国家发改委能源研究所. 电动汽车在上海电力系统中的应用潜力研究 [EB/OL]. (2016-09-01) [2020-05-30]. <http://www.nrde.cn/information/informationinfo?id=63&coo>.
- [15] 南方监督局. 南方区域电化学储能电站并网运行管理及辅助服务管理实施细则 [EB/OL]. (2018-01-18) [2020-05-30]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20180118/874999.shtml>.
- [16] 中商情报网. 全国各区域发电装机容量分布情况 [EB/OL]. (2018-08-12) [2020-05-30]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1608586408547268206&wfr=spider&for=pc>.
- [17] 刘可真, 徐玥, 刘鹤翔, 等. 面向用户侧的电能替代综合效益分析模型 [J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2020, 45(2): 81-91.
- LIU Kezhen, XU Yue, LIU Dongxiang, et al. A comprehensive benefit analysis model of electric energy substitution for user side [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 45(2): 81-91.
- [18] 环境保护部. 关于发布计算污染物排放量的排污系数和物料衡算方法的公告 [EB/OL]. (2017-12-28) [2020-05-30]. [http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201712/t20171229\\_428887.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201712/t20171229_428887.htm).
- [19] 国家发改委能源研究所. 电动汽车与电网互动的商业前景——上海市需求响应试点案例 [EB/OL]. [2020-05-30]. <http://www.nrde.cn/information/informationinfo?id=250&cook=2>.
- [20] 华东能源监管局. 华东区域并网发电厂辅助服务管理实施细则 [EB/OL]. (2019-04-26) [2020-05-30]. <http://zjb.nea.gov.cn/article/zygg/d1/201904/3388.htm>.
- [21] UVIG. Variable generation and electricity markets [EB/OL]. [2020-05-30]. <http://uvig.org/wp-content/uploads/2018/05/VGmarketstableApr2018.pdf>.
- [22] 国家能源局. 关于2019年度全国可再生能源电力发展监测评价的通报 [EB/OL]. (2020-05-16) [2020-05-30]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-05/16/content\\_5512148.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-05/16/content_5512148.htm).

#### 作者简介:



周椿奇

周椿奇(1995—),男,四川达州人,硕士研究生,主要研究方向为智能电网与电动汽车交互(**E-mail**:zhouchun7777@126.com);

向月(1987—),男,重庆人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为智能电网与电动汽车交互(**E-mail**:xiang@scu.edu.cn);

张新(1983—),男,山东济南人,副教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为新能源电力系统规划与运行、交通电气化

(**E-mail**:xin.sam.zhang@gmail.com)。

(编辑 陆丹)

## Potential regulation ability and economy analysis of auxiliary service by V2G: taking Shanghai area for an example

ZHOU Chunqi<sup>1</sup>, XIANG Yue<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>2</sup>, ZHANG Shenxi<sup>3</sup>, LIU Youbo<sup>1</sup>, LIU Junyong<sup>1</sup>, HU Shuai<sup>4</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. School of Water, Energy and Environment, Cranfield University, Bedfordshire MK43 0AL, UK;

3. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Transformation, Ministry of Education,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. Economic and Technological Research Institute of

State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750004, China)

**Abstract:** The rapid development and large-scale application of EVs (Electric Vehicles) in China has provided a foundation for the implementation of V2G (Vehicle to Grid) technology to regulate cluster EVs to participate in the auxiliary service. Based on the economic regulation model of EV charging and discharging with V2G technology participating in auxiliary services, the regulation ability and potential economic value of cluster EVs participating in auxiliary service and the environmental benefits brought by large-scale development of EVs are analyzed by using relevant statistical data of Shanghai area. Simulative results show that cluster EVs' participation in auxiliary service can not only reduce user cost, but also provide peak load shifting service for the local power grid, and the large-scale development of EVs can effectively reduce local CO<sub>2</sub> emissions. Further analysis shows that, with the increase of EV charging and discharging power and peak-valley electricity price ratio and the decrease of battery cost, the economic benefits of V2G application will increase.

**Key words:** electric vehicles; V2G; auxiliary service; regulation ability; economy; environmental benefits

# 附录 A

EV 环境效益模型如下:

$$C_{\text{heat}} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{m_c} \omega \eta (c_t - d_t) \lambda_c \quad (\text{A1})$$

$$C_{\text{oil}} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{m_c} \lambda B \eta_c L_d \quad (\text{A2})$$

$$L_d = \frac{c_t - d_t}{\tau} \quad (\text{A3})$$

$$\Delta C_{|\text{heat-oil}|} = C_{\text{heat}} - C_{\text{oil}} \quad (\text{A4})$$

其中,  $C_{\text{heat}}$  为火电机组的  $\text{CO}_2$  排放量(kg);  $m_{\text{CO}_2}$ 、 $m_c$  分别为  $\text{CO}_2$  与碳的相对原子质量;  $\omega$  为燃煤排碳系数;  $\eta$  为华东地区火力发电占该区域总发电量的占比;  $\lambda_c$  为煤电转化系数;  $C_{\text{oil}}$  为燃油汽车的  $\text{CO}_2$  排放量(kg);  $\lambda$  为燃油完全燃烧率;  $B$  为单位距离的平均油耗量;  $\eta_c$  为燃油中碳含量占比;  $L_d$  为上海市 EV 的行驶总距离;  $\tau$  为 EV 每千米的耗电量。

# 附录 B

表 B1 各类电动汽车的行为数据  
Table B1 Behavioral data of various types of EVs

单位: 万辆

| 时刻    | 电动私家车              |                |                | 电动公务车              |                |                |
|-------|--------------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|
|       | $N^{\text{Total}}$ | $N^{\text{C}}$ | $N^{\text{D}}$ | $N^{\text{Total}}$ | $N^{\text{C}}$ | $N^{\text{D}}$ |
| 01:00 | 14.62              | 0              | 0              | 4.165              | 0              | 0              |
| 02:00 | 14.62              | 0              | 0              | 4.165              | 0              | 0              |
| 03:00 | 14.62              | 0              | 0              | 4.165              | 0              | 0              |
| 04:00 | 14.62              | 0              | 0              | 4.165              | 0              | 0              |
| 05:00 | 14.62              | 0              | 0              | 4.165              | 0              | 0              |
| 06:00 | 14.62              | 0.86           | 4.3            | 4.165              | 0              | 0              |
| 07:00 | 11.18              | 0.86           | 2.58           | 4.165              | 0              | 0              |
| 08:00 | 9.46               | 0.86           | 5.16           | 4.165              | 0.147          | 0.49           |
| 09:00 | 5.16               | 10.32          | 1.72           | 3.822              | 0.343          | 2.45           |
| 10:00 | 13.76              | 3.784          | 1.72           | 1.715              | 1.96           | 0.245          |
| 11:00 | 15.824             | 2.064          | 4.128          | 3.43               | 0.49           | 0.98           |
| 12:00 | 13.76              | 1.72           | 0.86           | 2.94               | 1.225          | 0.49           |
| 13:00 | 14.62              | 1.72           | 0.86           | 3.675              | 0.98           | 0.49           |
| 14:00 | 15.48              | 2.58           | 1.72           | 4.165              | 0.735          | 2.45           |
| 15:00 | 16.34              | 2.58           | 1.72           | 2.45               | 0.735          | 1.47           |
| 16:00 | 17.2               | 1.72           | 3.44           | 1.715              | 1.225          | 0.49           |
| 17:00 | 15.48              | 3.44           | 10.32          | 2.45               | 1.96           | 0.735          |
| 18:00 | 8.6                | 6.88           | 1.72           | 3.675              | 0.98           | 0.49           |
| 19:00 | 13.76              | 1.72           | 3.44           | 4.165              | 0              | 0              |
| 20:00 | 12.04              | 1.72           | 2.58           | 4.165              | 0              | 0              |
| 21:00 | 11.18              | 3.44           | 2.58           | 4.165              | 0              | 0              |
| 22:00 | 12.04              | 2.58           | 1.72           | 4.165              | 0              | 0              |
| 23:00 | 12.9               | 0.86           | 0              | 4.165              | 0              | 0              |
| 24:00 | 13.76              | 0.86           | 0              | 4.165              | 0              | 0              |

表 B2 调频单价  
Table B2 Unit price of frequency regulation

| 时段 | 调频单价/<br>[元·(MW·h) <sup>-1</sup> ] | 时段 | 调频单价/<br>[元·(MW·h) <sup>-1</sup> ] | 时段 | 调频单价/<br>[元·(MW·h) <sup>-1</sup> ] |
|----|------------------------------------|----|------------------------------------|----|------------------------------------|
| 1  | 35                                 | 9  | 84                                 | 17 | 240                                |
| 2  | 35                                 | 10 | 105                                | 18 | 210                                |
| 3  | 35                                 | 11 | 140                                | 19 | 168                                |
| 4  | 35                                 | 12 | 161                                | 20 | 126                                |
| 5  | 50                                 | 13 | 168                                | 21 | 112                                |
| 6  | 63                                 | 14 | 190                                | 22 | 105                                |
| 7  | 50                                 | 15 | 200                                | 23 | 84                                 |
| 8  | 70                                 | 16 | 220                                | 24 | 50                                 |

表 B3 上海市的分时电价  
Table B3 Time-of-use electricity price in Shanghai

| 时段  | 电价/[元·(MW·h) <sup>-1</sup> ] |
|-----|------------------------------|
| 峰时段 | 06:00—22:00<br>677           |
| 谷时段 | 22:00 至次日 06:00<br>337       |

表 B4 EV 相关参数  
Table B4 Relevant parameters of EV

| 参数         | 取值  | 参数          | 取值    | 参数        | 取值          | 参数    | 取值    |
|------------|-----|-------------|-------|-----------|-------------|-------|-------|
| $\eta^C$   | 0.9 | $m_c$       | 12    | $\lambda$ | 0.95        | $P_h$ | 100 元 |
| $\eta^D$   | 0.9 | $\omega$    | 0.67  | $B$       | 0.063 kg/km |       |       |
| $\mu$      | 0.5 | $\eta$      | 74.5% | $\eta_c$  | 0.9         |       |       |
| $m_{CO_2}$ | 44  | $\lambda_c$ | 0.32  | $\tau$    | 0.2         |       |       |

巴斯(Bass)扩散模型如下:

$$n(t) = a(m - N(t)) + \frac{b}{m} N(t)(m - N(t)) \quad (B1)$$

其中,  $n(t)$  为第  $t$  年新增的 EV 数量;  $N(t)$  为第  $t$  年累计 EV 数量;  $m$  为市场最大潜力;  $a$  为创新系数 (外部影响),  $b$  为模仿系数 (内部影响), 根据对 2015—2019 年燃油汽车以及 EV 销量的历史统计数据拟合, 可得到  $a=0.01$ ,  $b=0.08$ 。最后得到 2025 年的 EV 预测量为 82 万辆, 2030 年的 EV 预测量为 155 万辆。

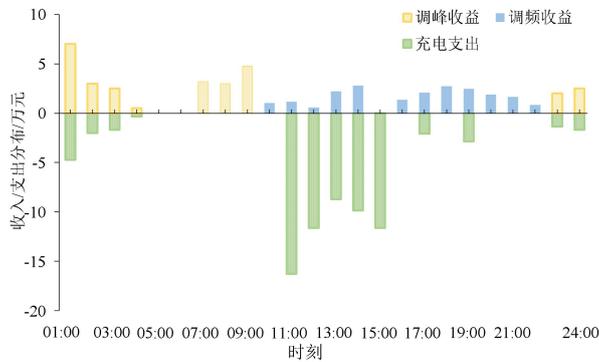


图 B1 电动公交车用户的收益、支出

Fig.B1 Revenue and expense of electric business car users

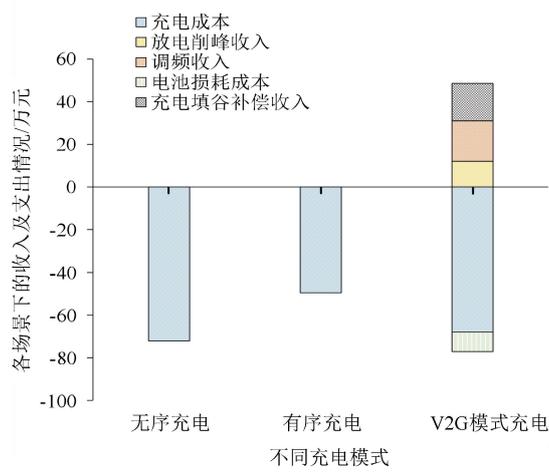


图 B2 不同充电模式下电动公务车的收益、支出  
Fig.B2 Revenue and expense of electric business car users under different charging modes

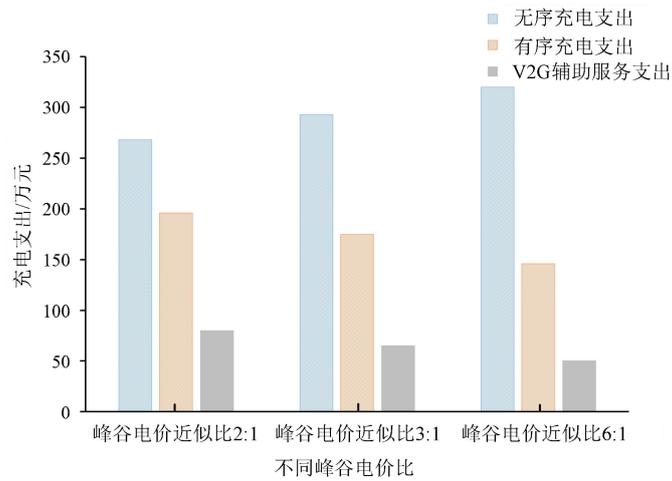


图 B3 不同峰谷电价比下的充电支出  
Fig.B3 Charging expenses under different peak-valley electricity price ratios

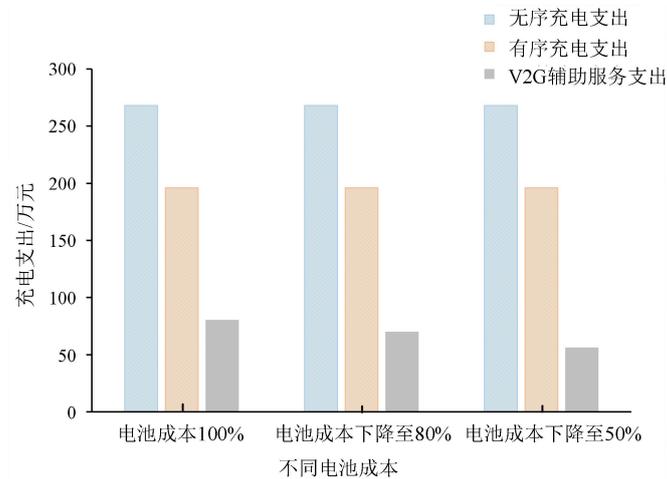


图 B4 不同电池成本下的充电支出  
Fig.B4 Charging expenses under different battery costs

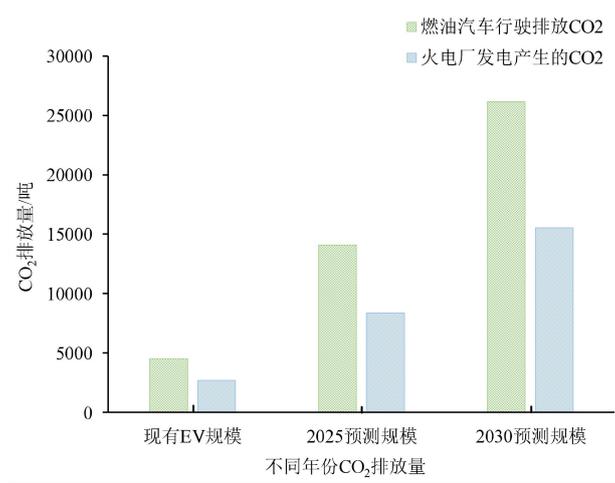


图 B5 电动汽车与燃油汽车 CO<sub>2</sub> 排放量对比

Fig.B5 Comparison of CO<sub>2</sub> emission between EV and oil-fueled automotive