

DOI: 10.7667/PSPC152240

实时电价下含 V2G 功能的电动汽车理性 充放电模型及其分析

王彪, 尹霞

(河南职业技术学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 为了利用实时电价实现电动汽车理性充电, 以电动汽车运营收益最大化为目标, 以满足电动汽车动力电池充放电容量及电动汽车行程需求为约束条件, 构造了一个电动汽车充放电收益最大化模型, 该模型较好地表示电动汽车充放电决策。以美国家庭出行调查为依据, 根据用户出行规律, 采用蒙特卡洛模拟法模拟用户行程需求, 对电动汽车充放电运行的经济效益进行仿真计算和分析。研究结果表明, 通过响应电网实时电价, 理性充放电模型可显著提高电动汽车的经济效益。同时, 由于夜间电价相对便宜而白天相对较高的电价激励, 电动汽车多在配电系统负载率较低时充电, 在系统峰荷附近反向放电, 从而起到削峰填谷的效应。

关键词: 电动汽车; 动力电池; 电动汽车接入电网; 收益模型; 实时电价; 移峰填谷

Modeling and analysis on the rational charging and discharging of electric vehicle with V2G function under real-time prices

WANG Biao, YIN Xia

(Henan Vocational and Technical College, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Under the constraints of power battery charging and discharging capacity and customer travel needs, an EV charging and discharging model is proposed to maximize the electric vehicle economic benefits and coordinate the charging and discharging of EVs. The vehicle travel behavior data used are derived from the National Household Travel Survey (NHTS). Monte Carlo simulation method is utilized to generate the trip's needs of customers based on actual customers' travel rule. The economic benefits of electric vehicle charging/discharging are simulated and analyzed. The results indicate that the economic benefits of the rational charging/discharging model can be significantly improved by responding the time of use electricity price. Meanwhile, due to the relatively cheaper off-peak electricity price at night than the expensive on-peak electricity price during the day, electric vehicles tend to charge at low load time and discharge inversely at peak load time in distribution system so as to achieve peak load shifting.

Key words: electric vehicle; power battery; vehicle to grid (V2G); benefits model; real-time price; peak load shifting

0 引言

随着电动汽车的发展与普及, 未来将会有大量电动汽车广泛接入电网, 电动汽车充电负荷是电力系统重要的新增负荷。文献[1-2]对电动汽车充电负荷计算方法进行了探索并对中国电动汽车在 2020 年充电负荷进行了预测。电动汽车放电负荷的特性对充电设施建设、系统调度以及相关政策分析都有

重要意义。电动汽车的 V2G 功能对电网稳定性、可靠性的提高有益, 通过电动汽车的电池储能进行削峰填谷、提供调频、备用等辅助服务, 文献[3]对电动汽车接入电网的影响及电动汽车充放电控制与应用方面进行了研究。电动汽车的负荷组合是一个挑战性的工作。无论是充电还是 V2G 都与电动汽车的行驶习惯、充放电设施的方便性、电池的特性以及充放电价格有关。

目前, 利用美国家庭出行调查数据, 在认为电动汽车用户与现有汽车用户用车方式基本相同的情

况下, 讨论了电动汽车充电负荷的特征。现有的研究表明, 需要通过充电的有序管理缓解随意充电而形成的充电高峰。有关 V2G 的研究目前人们从平均值上比较了 V2G 功能对电动汽车用户的好处, 从一般意义上讨论了 V2G 对电网的影响。

电动汽车充放电负荷特性研究中的难点在于充放电过程发生在: ① 电动汽车处于停驶状态; ② 车主愿意进行充放电; ③ 有充放电设施。第 1 条与行驶习惯有关, 通常首先要满足行驶需求, 第 3 条取决于充电站的设置, 难点在第 2 条。目前的研究大都数采取预先规定的方法, 如文献[4]采取电动汽车车主以最后一次回到时刻家充电。

本文构造一个电动汽车充放电收益最大化模型, 该模型较好地表现了电动汽车充放电决策, 为进一步讨论, 利用美国汽车行驶数据和电价政策进行分析, 具体讨论不同类型的电动汽车用户的负荷特征, 特别给出了 V2G 的提供特点。

1 电动汽车动力电池模型

1.1 动力电池容量及电池荷电状态

动力电池容量是电池性能的指标之一, 电池容量表示在一定条件下(温度、终止电压、放电倍率等)电池所释放的电量。 C_A 表示动力电池充满电时容量。目前人们已经开发了针对不同的应用的电池模型, 铅酸电池、锂离子电池、镍氢电池等^[5-6]。

电动汽车通过动力电池充放电与电网发生关系, 而其中最关键的指标是电池荷电状态(SOC)。电池的荷电状态是用来反映电池的当前状态, 这是国内国外较一致的认知, 其数值上则定义: 电池当前电量与完全充电电量的比值, 故电池荷电状态是以百分制的形式来描述电池当前可用容量, $SOC=1$ 表示动力电池充满状态, $SOC=0$ 表示动力电池放空状态。 S_S 表示电动汽车电池起始荷电状态, S_E 表示电动汽车电池终止荷电状态。 S_{MIN} 是动力电池允许最小荷电状态, 为了防止动力电池过放电, 当动力电池荷电状态低于允许最小荷电状态时, 中止放电; 为了防止动力电池过充电, S_{MAX} 是动力电池允许最大荷电状态, 当电池荷电状态高于允许最大荷电状态时, 中止充电, 过充电保护^[7-8]。动力电池荷电状态分布及其对应不同适用情况如图1所示。

1.2 动力电池 SOC 计算

1) 电动汽车行驶距离已知的条件下, 其电池消耗荷电状态

$$S_M = \frac{Q_M}{C_A} = \frac{100\xi_{100}d}{C_A} \quad (1)$$

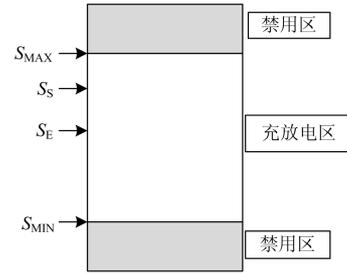


图 1 电池荷电状态分布对应不同适用情况

Fig. 1 SOC level available for different application types

式中: Q_M 为电动汽车行驶耗电电量; ξ_{100} 为动力电池百公里耗电量; d 为电动汽车行驶里程。

2) 当给电气汽车动力电池充电时, 充电后的得到荷电状态充电

$$S_C = \frac{Q^C(t)}{C_A} = \eta_C \frac{\int_0^{t^C} P^C(t) dt}{C_A} \quad (2)$$

式中: $Q^C(t)$ 为动力电池充电电量; $P^C(t)$ 为充电功率; t^C 为充电时间; η_C 为充电效率。

3) 电动汽车对电网供电的V2G服务, 电动汽车销售电能, 销售的电池荷电状态

$$S_D = \frac{Q^D(t)}{C_A} = \eta_D \frac{\int_0^{t^D} P^D(t) dt}{C_A} \quad (3)$$

式中: Q^D 为V2G服务放电电量; $P^D(t)$ 为V2G服务放电功率; t^D 为V2G服务放电时间; η_D 为放电效率。

1.3 动力电池损耗模型

几年来, 车用动力电池研究有了长足的进步, 目前, 电动汽车动力电池主要为铅酸电池, 镍氢电池, 锂离子电池, 这些电池技术应用于电动汽车, 为电动汽车提供动力, 其中锂离子动力电池能量大, 密度高, 循环使用寿命高, 体积小, 质量轻, 无污染, 安全性能较好, 锂离子动力电池应用广泛^[9-11]。

但电动汽车动力电池有寿命, 每次充放电都会对电池造成损耗, 其充放次数是有限的, 所以就会有电池充放电成本, 动力电动损耗成本 U 为电池充放电点单位电能折合的电池损耗费用率 μ 乘以电池的充电电量或放电电量

$$U = \mu \left[\frac{1}{2} \lambda^D Q^D + \frac{1}{2} \lambda^C Q^C \right] \quad (4)$$

式中: μ 为动力电池损耗费用率; λ^C , λ^D 分别为动力电池充电电量系数和V2G服务放电电量系数。文献[5, 7]给出了电池损耗费用率, 电池充电电量系数以及电池放电电量系数的取值范围。

1.4 日产 Altra 电动汽车动力电池

目前电动汽车大多采用锂离子车用动力电池,

本文采用日产电动汽车数据，电池容量为 29 kWh。电池充放电功率曲线并不是一条直线，而是一条不规则的曲线，对于锂离子动力电池而言，其充放电功率曲线可以近似为一条直线，在实际计算过程中把动力电池充放电功率近似为直线^[12]，锂离子动力电池充放电功率近似为 7 kW；充电时间 4 h 左右，日产电动汽车参数如表 1 所示。

表 1 日产电动汽车参数

Table 1 EV battery parameters of Nissan

电池类型	C_N / (kWh)	P / kW	ω_d / (cent/kWh)	ξ_{100} / (kWh/100 km)	S_{MIN}	S_{MAX}	λ^C/λ^D
锂离子 电池	29.07	7.25	4	14.7	0.18	0.92	0.1

2 电动汽车行驶数据及电价市场机制

2.1 美国家庭出行调查统计分析

用户行为即车辆行驶习惯是影响电动汽车充放电的关键因素，具有随机性，电动汽车起始充放电时刻和日行驶距离是对电动汽车产生影响的主要用户行为。本文使用的车辆出行行为数据来自于 2009 年美国交通部对全美家用车辆的出行调查结果^[13]，为了把数据输入到数学模型中去，对数据做进一步的处理。把每日行程进行分段，例如，汽车一日行程中有四段行程。根据统计结果每日行程数几乎都在两至六段。

根据 2009 年美国交通部家庭出行调查报告，可以统计汽车用户一日行程不适用概率情况，如图 2 所示，在一天行程中，汽车用户有 2~3 个使用高峰时段，第一时段是 7:00—9:00，第二时段是 13:00 前后，第三时段是 17:00—19:00，统计全美家庭出行用户来说，即使在使用高峰阶段，汽车不适用概率最低仍为 0.86，这就为汽车电池作为可再生分布式能源 V2G 服务提供了时间上的可能^[14]。

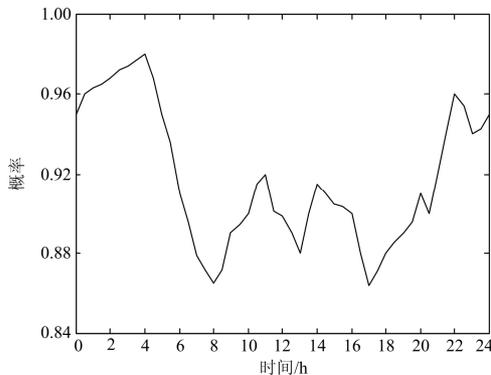


图 2 汽车一天中不使用概率情况

Fig. 2 Probability that private cars not in use for transportation

2.2 电价市场机制

电动汽车的充放电电价对于电动汽车充电负荷和 V2G 服务提供的时间分布具有重要的影响。从充电机制来说，很多作者建议采用分时电价机制给电动汽车充电负荷充电。文献^[17]给出的分时电价，即采用了 3 段，12:00—7:00 电价最低，8:00—14:00 以及 2:00—24:00 采用中等电价，而 13:00—22:00 则使用最高的电价。

对于提供 V2G 服务的电价，可以根据其具体服务的项目按照市场价格购买。本文研究利用电池储能进行削峰填谷，以及在高峰时段通过销售电能而获利。采用的电价为 PJM 市场的实时电价^[15]。以 2013 年全年的实时电价数据为基础，获得了 24 h 的电价分布。实时电价平均值如图 3 所示。

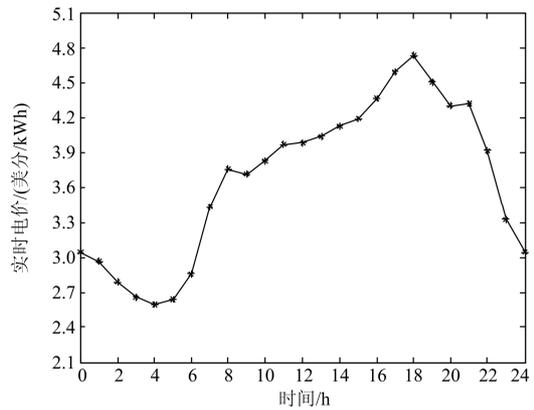


图 3 实时电价平均值

Fig. 3 Average value of real-time prices

3 电动汽车理性充放电决策模型

一辆电动汽车在一日行程中有 m 段行程，每段行程包含一个行驶过程和一个停驶过程，在第 i 段行程中共有 $seg(i)$ 个时段，将一日的的时间按照小时划分为 24 个时段。已知电动汽车的行程，则可以基于电动汽车的电池参数、电动汽车的行驶里程计算出电池的 SOC。电动汽车车主可以根据电价的情况以及电池 SOC 和行驶计划以运行收益最大化为目标，确定其中停驶期间是否进行充电或者进行 V2G 服务。电动汽车最优充放电运行模型如图 4 所示，其具体的电动汽车收益数学模型描述。

$$\max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{seg(i)} \left\{ [\eta\eta^D g_{i,j}(t) - \frac{1}{2}\mu\lambda^D] \int_0^{t_{i,j}^D} P^D(t) dt - [\eta\eta^C f_{i,j}(t) + \frac{1}{2}\mu\lambda^C] \int_0^{t_{i,j}^C} P^C(t) dt \right\} \quad (5)$$

式中： $g_{i,j}(t)$ ， $f_{i,j}(t)$ 分别为 t 时刻电动汽车在第 i 段行程第 t 个时段向电网放电的电价和充电的电

价, $g_{i,j}(t)$ 和 $f_{i,j}(t)$ 是动态实时电价; η 为电网转换效率。

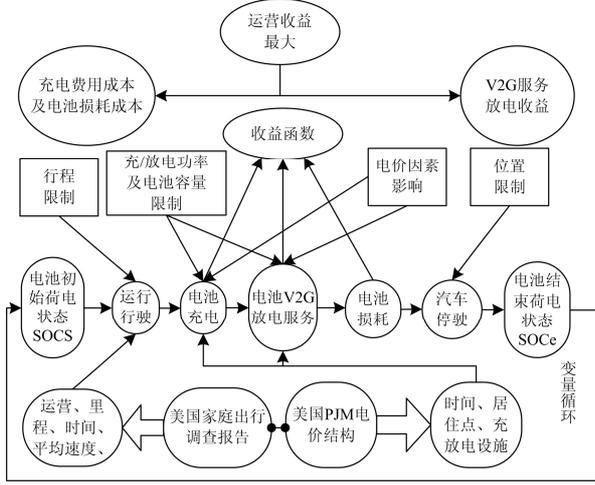


图4 电动汽车最优充放电运行模型

Fig. 4 EV optimal operating and charging/discharging model

模型约束条件如下所述。

1) 电量平衡约束。在一个周期的时间里(通常为 24 h, 第一个行程开始时的起始荷电状态等于最后一个行程的电池的荷电状态, 即在一日行程内充电电量减去放电电量为零。

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{seg(i)} \eta [\eta_c \int_0^{t_{i,j}^c} P^C(t) - \int_0^{t_{i,j}^d} P^D(t)] - 100W_{100} \sum_i d_i = 0 \quad (6)$$

2) 电动汽车行程约束。电动汽车动力电池起始电量满足第一个行程。

$$S_{MIN} C_A \leq S_S C_A - 100W_{100} d_1 \leq S_{MAX} C_A \quad (7)$$

电动汽车在完成第 k 段行程后开始充放电, 但要满足第 $k+1$ 段行程, $k=1, 2, \dots, m-1$ 。

$$S_{MIN} C_A \leq S_S C_A + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{seg(i)} \eta [\eta_c \int_0^{t_{i,j}^c} P^C(t) - \eta^D \int_0^{t_{i,j}^d} P^D(t)] - 100W_{100} \sum_{i=1}^{k+1} d_i \leq S_{MAX} C_A \quad (8)$$

3) 电池荷电状态约束。电动汽车在每个时段充电最大充/放电量要小于电池允许最大荷电状态。电动汽车在第 k 段行程充放电结束时电动汽车电量要满足大于最小允许荷电状态, 小于最大允许荷电状态。电动汽车在第 $k(k=1, 2, 3, \dots, m)$ 段行程第 $l(l=1, 2, 3, \dots, seg(i))$ 个时段池充/放电结束时电动汽车电量要满足不小于动力电池最小允许荷电电量, 不大于最大允许荷电电量, 共有 $\sum_{i=1}^m seg(i)$ 个这

类约束条件。

$$S_{MIN} C_A \leq S_S C_A + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{seg(i)} [\int_0^{t_{i,j}^c} P^C(t) - \int_0^{t_{i,j}^d} P^D(t)] - \quad (9)$$

$$100W_{100} \sum_{i=1}^k d_i \leq S_{MAX} C_A$$

4) 时间约束。电动汽车在同一时段内可以选择充电或放电但不可同时进行充放电; 电动汽车在行驶时不能充电或 V2G 放电。

$$t_{i,j}^D t_{i,j}^C = 0 \quad (12)$$

$$t_M = 0 \quad (13)$$

式中, t_M 为电动汽车行驶时间段。

本文建立的电动汽车有序充电优化模型为混合规划模型, 使用YALMIP工具箱^[16]进行求解。

4 基于蒙特卡洛模拟法计算及分析

4.1 考虑行驶时间里程速度随机性的模拟模型

全面考察电动汽车行驶情况与电价政策的影响, 本文按照第2.1节的方式对出行数据进行统计。并对PJM的电价按照第2.2节的方式进行统计。进一步考虑电动汽车用户不同天的行程数目的变化以及行程的距离, 开始时间等都会有变化, 采用蒙特卡洛模拟可得到实际电价、行驶特点情况下电动汽车充放电特点^[17-21]。

首先按照行程的概率选择当日的行程, 然后根据行程次数的类别中开始时间的分布, 行驶时间的分布以及行驶速度的分布, 求得获得一个确定的当日行驶安排。然后利用充放电模型进行充放电决策, 其流程如图5所示。

实际仿真结果表明, 在模拟5000次后电动汽车日平均充放电收益平均值基本不变, 为兼顾计算速度及精度, 将蒙特卡罗模拟次数设为5000次。

充放电都采用实时电价时, 电动汽车则有较好的收益。可将CASE A当做现有的电价水平下的电动汽车含V2G的情况, 而将CASE B近似的将电动汽车看成是电力市场一份子, 显然在CASE B中电动汽车电池的存储收益是相当可观的。这也为未来的电价制定留下了相当大的空间。按照第3.1节给出的算法, 在充电电价采用分时电价, 而V2G电价采用PJM的实时电价(称之为CASE A), 以及充电电价和放电电价均采用实时电价(称之为CASE B), 求得电动汽车的运行成本收据, 如表2所示。

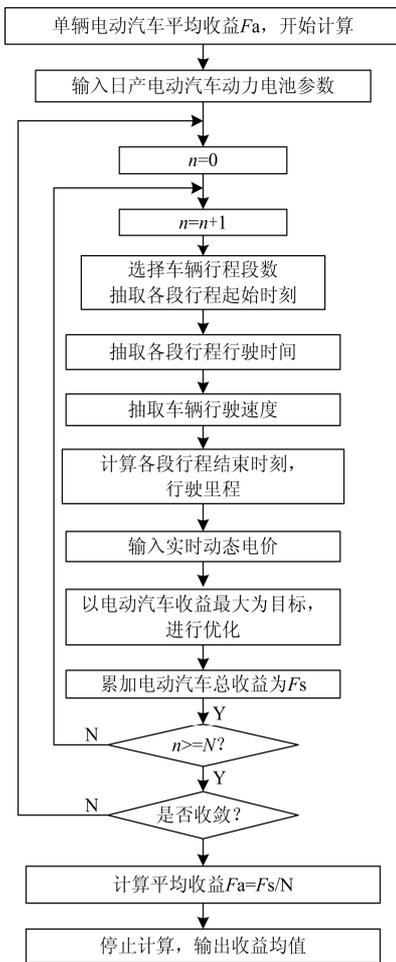


图 5 基于蒙特卡洛模拟的电动汽车收益计算流程
Fig. 5 Flow chart of EV profit value based on Monte Carlo simulation

表 2 2~6 段行程收益值

Table 2 Profit value of 2 to 6 trips

行程	2 段行程	3 段行程	4 段行程	5 段行程	6 段行程
CASE A 收益/美分	-22.2	-40.3	-43.8	-53.7	-69.4
CASE B 收益/美分	+44.0	+31.6	+27.8	+16.7	+8.1

4.2 充放电特性分析

目前，部分文献根据全美家用车辆的调查统计结果，假设电动汽车开始充电时刻为最后一次出行返回时刻，通过对数据进行曲线拟合，则起始充电时刻大致可以认为满足正态分布，并通过计算得到正态分布，均值 $\mu = 17.6$ ，均方差 $\sigma = 3.4$ 。从而可以得到电动汽车起始充电时刻数学模型。电动汽车所消耗的电量与出行距离相关，并根据全美家用车辆的调查统计结果，得出结论，日行驶里程满足对数正态分布，均 $\mu = 3.2$ ，均方差 $\sigma = 0.88$ 。从而可

以得到电动汽车起始荷电状态数学模型。若电动汽车数据采用本文中的日产纯电动汽车数据，从而可以得到平均单辆电动汽车充电负荷曲线，如图 6 所示。

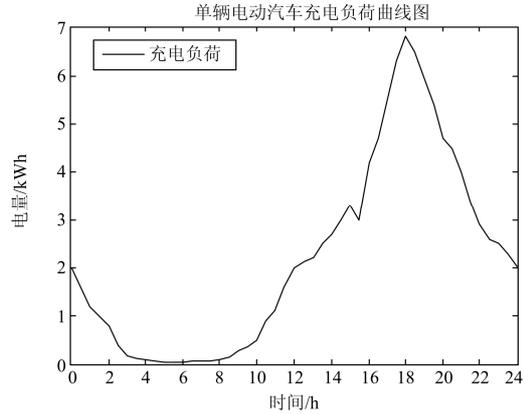


图 6 单辆电动汽车充电负荷

Fig. 6 Single electric vehicle charging load curve

以电动汽车开始充电时刻认为最后一次出行返回时刻，则由图 6 可知，则电动汽车充电负荷低谷在 24:00—10:00；而充电负荷高峰在 16:00—22:00，在 4:00—7:00 几乎没有充电负荷，在 18:00—19:00 达到充电负荷最高峰，这不仅没有达到削峰填谷的目的，反而加剧了峰谷差。

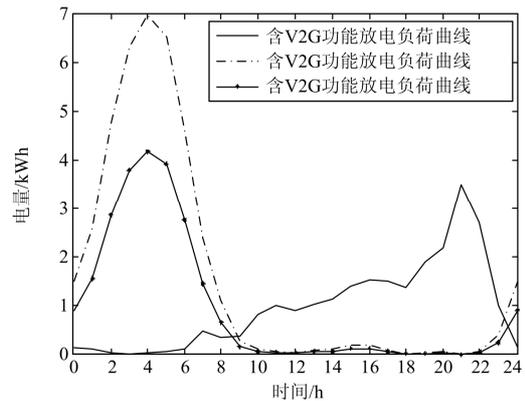


图 7 实时电价下单辆电动汽车充放电负荷

Fig. 7 Single electric vehicle charging load curve under real-time prices

图 7 为实时电价下单辆电动汽车充放电负荷图，当没有 V2G 功能时，通过充电仅补偿交通行驶消耗的电池电能。按照实时电价机制，其充电曲线分布如图所示。由充电曲线可以发现，对实时电价而言，其不同小时的电价是不同的，因此其分布也就更具有变化性(例如在 15:00 时刻还有不可忽视的充电电量)，而不进行 V2G 服务的情况相比，进行 V2G 务后的尼桑电池充电量增加了 10.7 kWh，是其不参

与V2G服务时充电量的1.63倍。这些新增加的电量将作为V2G服务返回给了电网,也就是说,如果采用对等的电价机制,电动汽车主在自愿的原则下,会提供至少与交通耗电相当的电量进行V2G服务。电动汽车进行V2G服务的潜力非常大。有如此大的电量进行V2G服务的原因是在充电和V2G均采用实时电价时,V2G的收益比较好。日产电池提供V2G服务后增加了40.21美分的收益,减去其充电增加的充电费用以及因为多进行充放电而形成的电池损耗费用,一日还可增加收益30.56美分。

本文采用实时电价的目的是有两个:①说明当充放电电价采用具有相同水平的实时电价时,即便考虑电池的损耗,电动汽车电池提供V2G服务可以让电动汽车获得更多的利益;②说明由于电动汽车在采用实时电价作为充放电电价后,其可以获取的利益相对非常大,且V2G功能实现后有足够的经济空间通过成立中间的组织实施管理有序充电。这再次说明如果采用实时电价,则只有动态调整实时电价,才有可能平抑新的充电高峰。

5 结论

本文根据2011年美国交通部对全美家用车辆的出行调查结果,结合日产纯电动汽车运行相关数据,以电动汽车运营效益最大化为目标,以电动汽车充放电容量满足电动汽车行程需求为约束条件,构造了一个电动汽车充放电收益最大化数学模型,该模型较好地表示电动汽车充放电决策,通过仿真分析,得到以下结论。

1) 本文利用日行程和电价信息,构造了一个包含V2G功能的电动汽车充、放电模型,为考虑电动汽车车主的意愿提供了一种工具。

2) 利用该模型可以发现,电动汽车采用V2G技术后会给电动汽车车主带来利益,而且还可以协助电网提供削峰填谷功能,是推动电动汽车发展的积极因素。

3) 利用该模型,本文考察了基于美国PJM实时电价和分时电价以及都采用实时电价情况下电动汽车的充、放电策略。发现电动汽车充电电价在批发的实时电价和分时电价之间存在可调整的空间,为组织充电供应商提供了经济上的可能性。

4) 本模型还可以进一步包含多辆电动汽车的情况,进而成为讨论整体电动汽车负荷的工具。

参考文献

[1] LUO Z, SONG Y, HU Z, et al. Forecasting charging load

of plug-in electric vehicles in China[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE. IEEE, 2011: 1-8.

[2] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 36-42.

LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36-42.

[3] 胡泽春, 宋永华, 徐智威. 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. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10.

[4] The U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, National Household Travel Survey, 2009[EB/OL]. <http://nhts.ornl.gov/download.shtml#2009>.

[5] PETERSON S B, APT J, WHITACRE J F. Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(8): 2385-2392.

[6] 连湛伟, 石欣, 克潇, 等. 电动汽车充换电站动力电池全寿命周期在线检测管理系统[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 137-142.

LIAN Zhanwei, SHI Xin, KE Xiao, et al. The whole life cycle on-line detection and management system of power battery in the electric vehicle charging and exchanging station[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 137-142.

[7] OLDEWURTEL F, BORSCHÉ T, BUCHER M, et al. A framework for and assessment of demand response and energy storage in power systems[C] // Bulk Power System Dynamics and Control-IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid (IREP), 2013 IREP Symposium. IEEE, 2013: 1-24.

[8] 张聪, 许晓慧, 孙海顺, 等. 基于自适应遗传算法的规模化电动汽车智能充电策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 19-24.

ZHANG Cong, XU Xiaohui, SUN Haishun, et al. Smart charging strategy of large-scale electric vehicles based on adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 19-24.

[9] 胡信国. 动力电池进展[J]. 电池工业, 2007, 12(2): 113-118.

HU Xinguo. The development trends of the power batteries[J]. Chinese Battery Industry, 2007, 12(2):

- 113-118.
- [10] 王少龙, 侯明, 王瑞山. 动力电池的研究现状及发展趋势[J]. 云南冶金, 2007, 12(2): 113-118.
WANG Shaolong, HOU Ming, WANG Ruishan. Research situation and development trend of power battery[J]. Yunnan Metallurgy, 2007, 12(2): 113-118.
- [11] 郭煜华, 范春菊. 含大规模电动汽车的配电网保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 14-20.
GUO Yuhua, FAN Chunju. Research on relaying technologies of distribution network including mass electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 14-20.
- [12] QIAN K, ZHOU C, ALLAN M, et al. Load model for prediction of electric vehicle charging demand[C] // Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on. IEEE, 2010: 1-6.
- [13] QIAN K, ZHOU C, ALLAN M, et al. Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 802-810.
- [14] ZHANG L, BROWN T, SAMUELSEN S. Evaluation of charging infrastructure requirements and operating costs for plug-in electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2013, 240: 515-524.
- [15] Markets & operations, Energy markets, day-ahead energy market[EB/OL].<http://www.pjm.com/markets-and-perations/energy/day-ahead.aspx>.
- [18] LOFBERG J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB[C] // Computer Aided Control Systems Design, 2004 IEEE International Symposium on. IEEE, 2004: 284-289.
- [19] LU L, HAN X, LI J, et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2013, 226: 272-288.
- [20] GENG Y, MA Z, XUE B, et al. Co-benefit evaluation for urban public transportation sector—a case of Shenyang, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 58: 82-89.
- [21] 刘贵平, 刘坤杰, 刘娜. 闭环需求化风电场运维模式[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(6): 143-152.
LIU Guiping, LIU Kunjie, LIU Na. Maintenance management model of the closed-loop demand wind farm[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(6): 143-152.

收稿日期: 2015-12-28; 修回日期: 2016-07-22

作者简介:

王 彪(1985-), 男, 工程硕士, 讲师, 主要研究方向为单片机技术、电动汽车技术、汽车电子技术; E-mail: wbhn1985@sina.com

尹 霞(1979-), 女, 学士, 讲师, 研究方向为单片机技术、电动汽车技术、汽车电子技术。

(编辑 张爱琴)