

# 电动汽车参与电力市场的商业运营模式研究

刘敦楠<sup>1</sup>, 王梅宝<sup>1</sup>, 李根柱<sup>1</sup>, 张涛<sup>2</sup>, 卢永平<sup>2</sup>, 陈永权<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学经济与管理学院, 北京市 昌平区 102206;

2. 国网山西省电力公司, 山西省 太原市 030021)

## Business Model for Optimal Electric Vehicle Participation in Electricity Market

LIU Dunnan<sup>1</sup>, WANG Meibao<sup>1</sup>, LI Genzhu<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>2</sup>, LU Yongping<sup>2</sup>, CHEN Yongquan<sup>1</sup>

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;

2. State Grid Shanxi Electric Power Corporation, Taiyuan 030021, Shanxi Province, China)

**Abstract:** The vigorous development of electric vehicles (EVs) has become an important component of the “green” energy and power transformation in China. As mobile power loads with energy storage capability, EVs have dual attributes of load and power, and the design of an appropriate business model for EV participation in an electricity market that efficiently absorbs renewable energy is a challenging technical problem. To address this question, this paper analyses the relationship between renewable energy and the output of EVs in the electricity market, explores the characteristics of EVs, designs a basic framework of EV participation in the electricity market, and analyses the participation of EVs in the electricity market from three perspectives: the operator of a power grid, an electricity retailer, and the operator of a virtual power plant. A typical urban scenario in China is selected for a comparative economic analysis of the three business models. The simulation results show that the proposed method can encourage EVs to participate actively in electricity market transactions, and EV charging and discharging can mitigate the impact of wind and photovoltaic fluctuations on the power grid. Thus, this study offers important insight that can be leveraged to improve the capacity of renewable energy absorption.

**Keywords:** electric vehicle; electricity market; market framework; business model

**摘要:** 大力发展电动汽车是能源电力绿色转型的重要途径之一。电动汽车作为一种具备储能功能的移动式电力负载, 具有负荷和电源双重属性, 如何设计其参与电力市场的商业

模式以高效消纳可再生能源, 是实现能源电力绿色转型面临的极具挑战性的技术难题。鉴于此, 分析了电力市场环境下可再生能源与电动汽车的出力关系, 探索了电动汽车自身特性, 设计了电动汽车参与电力市场的基本架构; 进一步从电网、售电公司、虚拟电厂三个角度分析并提出了电动汽车参与电力市场的商业模式; 最后选取某典型城市市场场景对三种商业模式进行了经济性对比分析, 仿真结果表明提出的方法能够鼓励电动汽车积极参与电力市场交易, 利用电动汽车充放电缓解风、光伏发电波动对电网造成的冲击, 同时有利于提升可再生能源消纳能力。

**关键词:** 电动汽车; 电力市场; 市场框架; 商业模式

## 0 引言

当前全球能源体系正向清洁低碳转变, 可再生能源得到快速发展。为保障电网安全稳定运行, 大规模可再生能源并网要求电力系统具备更高的灵活性, 以满足能源电力清洁转型的巨大需求<sup>[1]</sup>。与此同时, 随着中国电动汽车的日益普及, 电动汽车在需求响应<sup>[2]</sup>、V2G<sup>[3]</sup>、辅助服务<sup>[4]</sup>等市场中的作用越来越重要, 对电网的规划、调度控制及运行带来了新的挑战<sup>[5]</sup>。

电动汽车具有典型的负荷和电源双重属性, 在建设安全经济环保的智能电力系统方面作用巨大, 更是解决交通、能源和环境问题的重要手段之一。各国学者在电动汽车参与电力市场层面进行了广泛而深入的研究。文献[6]基于电力辅助服务交易, 提出了电动汽车提供备用交易的方法。文献[7]分析了电动汽车竞标对电价的影响, 从电动汽车参与日前和实时电能市场方面构造了二层竞标策略模型。文献

基金项目: 国家电网公司科技项目 (SGTYHT/17-JS-199)。

Science and Technology Foundation of SGCC (SGTYHT/17-JS-199).

[8]运用区块链技术,提出了基于区块链的充电权交易机制与模型。文献[9]提出了以可靠性综合电价为衡量指标的计及V2G备用服务的备用交易新模式。文献[10]在电动汽车充电特性的基础上,提出了电动汽车结合日前实时统一交易模型。文献[11]考虑了电动汽车的V2G特性,提出电动汽车接入场景下的电网多目标交易。文献[12]提出了电动汽车联网与电能双向传输的概念,美国以此建设了示范项目。文献[13]基于澳大利亚珀斯市电力供需现状,研究了澳大利亚珀斯市大规模接入电动汽车后对输电线路的冲击。文献[14]基于交易式控制原理建立了一种分布式实时滚动充电管理框架。文献[15]对比分析了V2G的市场、控制策略和商业模式。文献[16]建立了电动汽车群、新增实体和电网公司多方动态非合作博弈模型。文献[17]提出了出行链概念,并从用户角度出发,利用马尔科夫链基于蒙特卡洛法模拟建立时空负荷模型。文献[18]以最小配电网网损为目标函数展开分析,基于EV行为特征划分集群并制定了用户满意的延时充放电策略。

上述工作偏重于研究电动汽车参与电力交易的模型及方法、参与电网互动策略等微观层面,而较少涉及从宏观层面研究电动汽车参与电力市场交易的商业模式。由此产生的一个技术难题是:如何促使电动汽车参与电力市场化交易,从而促进电力系统低碳绿色经济发展。围绕上述难题,本文首先从电动汽车与可再生能源协同关系出发,设计了电动汽车参与电力市场的框架;其次考虑市场环境下电动汽车充放电特性,从电网、售电公司、虚拟电厂三方面分析并提出了电动汽车参与电力市场交易的商业运营模式;最后,对三种商业模式进行经济性分析,验证了本文所提方法的有效性和正确性。本文工作为电动汽车有序高效参与电力市场交易提供了重要的理论支撑。

## 1 电动汽车参与电力市场框架

### 1.1 电动汽车与可再生能源出力关系

为保障电网安全经济运行,电网调控中心通过提前预测用户负荷来制定各机组的发电计划。但是随着可再生能源装机比例的不断提高,通过发电计划与调度指令很难满足电网安全经济运行方面的需求,由此对电力系统灵活调节能力的要求日益增高。图1所示为中国某城市典型工作日电网(含高比例风光发电)负荷、电动汽车充放电与风光出力曲线图,从该图可

以看出,电动汽车出行高峰时段之后,电力系统负荷达到峰值,其峰谷差较大会导致系统运行成本增加;同时风电、光伏等可再生能源发电虽然受季节与天气变化的影响,但风电、光伏的最大出力分别出现在凌晨和中午时段,而电动汽车在此时段一般处于闲置状态。

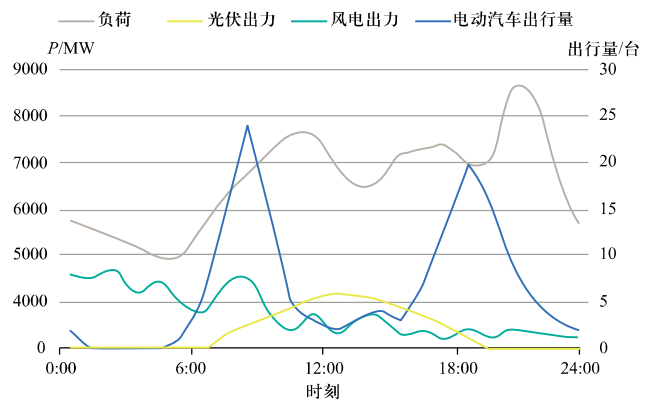


图1 电网负荷、电动汽车出行与风光出力曲线

Fig. 1 Power load, traffic flow of EV, wind and PV power output curve

因此,在引导电动汽车有序充放电时应深入结合当地电网负荷峰谷分布、风光发电特性与电动汽车出行状况,制定合理的充放电时序,以促使电动汽车与可再生能源的协同发展,使其与电网安全经济运行需求在时间分布上形成良好的互补。这不仅可为电动汽车融入电力市场提供合理可行的商业模式,提升可再生能源并网水平从而大幅降低碳排放,还能有效提升电网与交通网的良性互动水平。

### 1.2 电力市场下电动汽车的定位

电动汽车参与电力市场的主要模式包括直接接入与间接接入。直接接入模式指电动汽车以集群形式在公共停车场直接接入大电网,由电网直接调控;间接接入模式指电动汽车通过家庭、楼宇或由第三方集成运营商(车辆与电网之间的中间商,负责车辆调度和经营管理)聚集的方式接入<sup>[21]</sup>。2种模式下电动汽车参与电力市场架构如图2所示。

电动汽车参与电力市场化交易时,可发挥其电能双向传输的优异特性:一方面在电网处于负荷低谷或即将发生弃风弃光时,采用低价电方式鼓励电动汽车优先使用可再生能源充电,从而减少系统中常规机组的启、停成本,提高可再生能源消纳水平;另一方面在电网处于负荷高峰时,采用高电价方式鼓励电动汽车少用电、多放电,从而有效降低系统装机容量,减少电网投资运行成本。

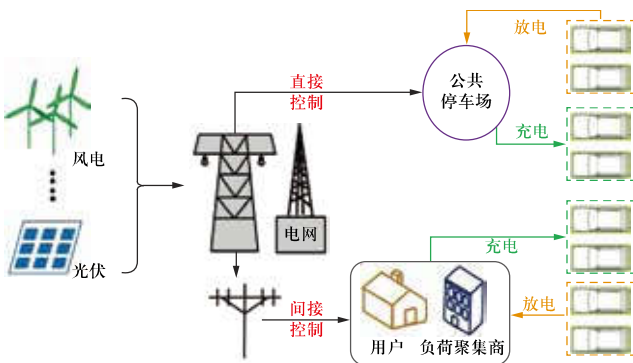


图2 电动汽车参与电力市场基本框架

Fig. 2 Basic framework of electric vehicle participation in electricity market

## 2 市场环境下电动汽车特性分析

### 2.1 电动汽车特性分析

电动汽车作为电力市场中新增消费体，其自身固有特性能够为其参与电力市场化交易提供支撑条件，主要原因包括：①电动汽车停车时间较长，且充电时间与电网晚高峰时期基本相同，若采用合理可行的手段引导电动汽车避开高峰充电，则能有效促进电网削峰填谷；②电动汽车自身的车载通信系统较为完善，内部一般均装有对充放电数据进行监控和计量的装置，降低了其参与市场交易基础设施的投入成本；③不同型号、不同用途的电动汽车的电池容量不同，规模化的电动汽车群具有较大的响应容量，可在响应电网需求时提供较高的灵活性调节空间。

需要说明的是，为了确保电动汽车出行需求与降低放电行为对电池的损耗，电动汽车电池理论上要保存一定的剩余电量，约为电池额定容量的20%。鉴于此种情况，设 $t$ 时段电动汽车充放电状态为 $N_t$ ，则有

$$N_t = \begin{cases} 0, & \frac{E_t}{E_z} \leq 20\% \\ 1, & \frac{E_t}{E_z} > 20\% \end{cases} \quad (1)$$

式中： $E_z$ 表示电动汽车电池额定容量； $E_t$ 表示在 $t$ 时段电动汽车剩余电量；0表示电动汽车充电状态；1表示电动汽车放电状态。

$$E_t = \begin{cases} E_{t-1} + P_o \times T_o \times (1 - \gamma), & N_t = 0 \\ E_{t-1} - P_i \times T_i \times (1 - \gamma) - \frac{\varepsilon}{100} \times \Delta L, & N_t = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $P_o$ 为充电桩的输出功率； $P_i$ 为充电桩的输入功率； $\gamma$ 为电动汽车充放电损耗； $T_o$ 、 $T_i$ 分别为 $t$ 时段内电动汽车充放电时间； $\varepsilon$ 为电动汽车百公里耗电量； $\Delta L$ 为该

时段内电动汽车行驶里程。

电动汽车的充放电时间与电池剩余电量有关。假设电动汽车有效充满状态是电池额定容量的90%，结合用户用车需求，则 $t$ 时段内电动汽车持续充放电时长 $T(N_t)$ 可表示为：

$$T(N_t) = \begin{cases} \frac{E_z \times 90\% - E_t}{P_o}, & N_t = 0 \\ \frac{E_t - E_z \times 20\%}{P_i}, & N_t = 1 \end{cases} \quad (3)$$

### 2.2 需求侧资源特性对比分析

电动汽车作为一种特殊的需求侧资源，一方面可充当用电负荷，另一方面又可作为分布式的储能。与其他需求侧资源相比，在响应时长、响应可靠性、响应可控性以及节能减排效果等方面均具有显著优势，如表1所示。

表1 需求侧资源特性对比

Table 1 Comparison of demand side resource characteristics

特性	电动汽车	其他需求侧资源
响应时长	较长	一般
响应可靠性	高	低
响应经济性	一般	好
响应可控性	易	难
节能减排效果	优	良

随着中国售电市场的形成和现货市场逐步建设，电动汽车作为需求侧资源带来的效益越来越显著。作为分散的终端用户，电动汽车有助于加快分时电价、实时电价以及容量电费在用户侧的完善，还能够提高电网供电可靠性与电能质量，充分发挥终端服务价值；同时，电动汽车集成参与需求响应、现货市场交易和调频、备用等辅助服务市场化交易不断成熟。在互联网与通信技术推动下，电动汽车参与电力市场化交易将涌现出更多的商业模式。

## 3 电动汽车参与电力市场商业模式

### 3.1 商业模式一：电动汽车直接参与电力市场

电动汽车直接参与电力市场交易是指电网直接控制大型公共停车场中的充电桩，通过分时电价、实时电价、打捆交易等措施引导电动汽车用户有序充放电，以满足电网稳定运行需求，促进可再生能源消纳，其原理如图3所示。

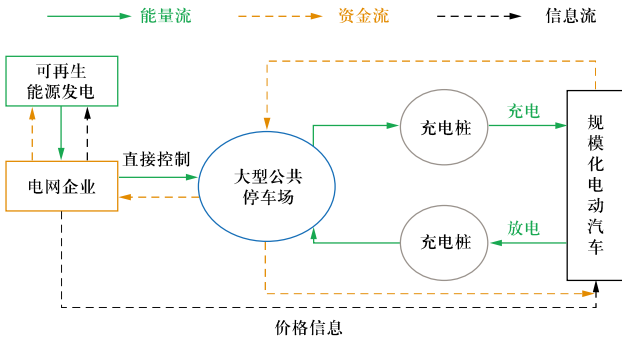


图3 电动汽车直接参与电力市场商业模式

Fig. 3 Direct participation of electric vehicle in business model of electricity market

1) 服务内容。

电网企业为满足可再生能源消纳与保障电网稳定运行等方面的需求，为电动汽车用户提供相应的服务，内容包括：①为满足电动汽车用户出行等需求，采用价格激励措施提供不同时段、不同价格的充放电服务；②为便捷电动汽车用户充放电及时性，提供信息共享服务。同时将大型公共停车场位置、充电桩空闲状态、价格等相关信息发布在网络上，电动汽车借助手机APP获取相关信息。

2) 收入来源。

此商业模式下，电网企业作为运营商，其收入主要来源于电动汽车充电电费及服务费，即

$$S_1 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{m=1}^M T_{m,i}(t) P_{m,i}(t) p_c(t) \quad (4)$$

$$T_{m,i}(t) = F_m(T_m(N_t), T_{pv}, T_{wv}, T_{th}) \quad (5)$$

$$p_c(t) = p_e(t) + p_w \quad (6)$$

式中： $S_1$ 为电网企业收入； $M$ 为电动汽车总数； $P_{m,i}(t)$ 为 $t$ 时段针对第 $m$ 辆电动汽车的充电功率； $p_c(t)$ 为 $t$ 时段电动汽车充电费用； $T_{m,i}(t)$ 为第 $m$ 辆电动汽车的充电时间，由函数 $F_m$ 确定， $T_m(N_t)$ 由式(3)决定； $T_{pv}$ 为光伏大发时段； $T_{th}$ 为电网负荷低谷时段； $T_{wv}$ 为风电大发时段； $p_e(t)$ 为 $t$ 时段电动汽车充电电费； $p_w$ 为电动汽车充电服务费。

3) 服务成本。

服务成本主要包括：电网购电费用、电动汽车放电补偿、充电桩运维费用及其它成本。其它成本主要包括：信息发布与网络费用。具体表述如下：

$$C_1 = C_g + C_b + C_q + C_y \quad (7)$$

$$C_g = Q_z \times p_z \quad (8)$$

$$C_b = \sum_{t=1}^{24} \sum_{m=1}^M T_{m,o}(t) P_{m,o}(t) \times p_b \quad (9)$$

$$T_{m,o}(t) = \bar{F}_m(T_m(N_t), T_{ph}) \quad (10)$$

式中： $C_1$ 为电网企业服务成本； $C_g$ 为电网企业购电成本； $C_b$ 为电动汽车放电补偿； $C_q$ 为其它成本； $C_y$ 为充电桩运维成本； $Q_z$ 为总充电量； $p_z$ 为批发交易价格； $T_{m,o}(t)$ 为第 $m$ 辆电动汽车的放电时间，由函数 $\bar{F}_m$ 确定； $P_{m,o}(t)$ 为 $t$ 时段针对第 $m$ 辆电动汽车的放电功率； $p_b$ 为电动汽车放电价格； $T_{ph}$ 为电网负荷高峰时段。

3.2 商业模式二：可再生能源跨省批发-省内分散零售

2019年5月10日由国家发改委、国家能源局颁布的《关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知》中提出2020年正式实施可再生能源消纳监督与考核。在此背景下，售电公司作为被考核主体，可在商业模式一的框架下，代理电动汽车用户参与跨省跨区交易购买低价可再生能源电力，一方面能够促进省外可再生能源消纳，满足自身消纳权重；另一方面可以进一步调动电动汽车用户参与电力市场的积极性。该模式工作原理如图4所示。

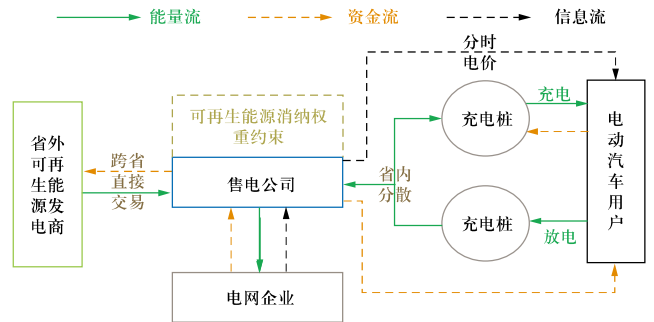


图4 可再生能源跨省批发-省内分散零售商业模式

Fig. 4 Interprovincial wholesale-distributed retail business model for renewable energy

1) 服务内容。

基于特高压输电技术，充分发挥其输电容量大、距离远、损耗低的优点，促进可再生能源在大范围内消纳。该模式下售电公司采用跨省跨区直接交易方式购买省外低价可再生能源电，在计入充电设施投资及其运维成本后，再以低于本省电动汽车充电价格的方式进行省内分散零售交易，以扩大市场规模。

2) 收入来源。

此商业模式下，售电公司作为运营商，其收入主要来源于电动汽车充电电费及服务费，即

$$S_2 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{m=1}^M T_{m,i}(t) P_{m,i}(t) p_c'(t) \quad (11)$$

$$p_c'(t) = p_c(t) + p_w \quad (12)$$

式中： $S_2$ 为售电公司收入； $p_c(t)$ 为 $t$ 时段售电公司制定的电动汽车充电费用； $p_c'(t)$ 为 $t$ 时段售电公司制定的电动汽车充电电费。

### 3) 服务成本。

服务成本主要包括：跨省购买可再生能源电力的费用、特高压输电费、充电桩运维费用及其他成本，具体表述如下：

$$C_2 = C_y + C_q + C_g' \quad (13)$$

$$C_g' = Q_z \times (p_{wz} + p_g) \quad (14)$$

式中： $C_2$ 为售电公司服务成本； $C_g'$ 为省间购电成本； $p_g$ 为特高压输电费用； $p_{wz}$ 为省间批发交易价格。

### 3.3 商业模式三：以虚拟电厂为载体间接参与电力市场

分散的电动汽车参与电力市场交易，将面临较高的市场门槛，从而影响用户响应程度。虚拟电厂是利用先进的调控、计量、通信技术把分布式发电、分布式储能设施、可控负荷等不同类型分布式资源进行整合优化参与市场交易的载体。电动汽车作为移动储能设施具备的优异特性，使其能够很好地融入虚拟电厂，从而以间接方式参与电力市场，打破了市场门槛的限制。该模式工作原理如图5所示。

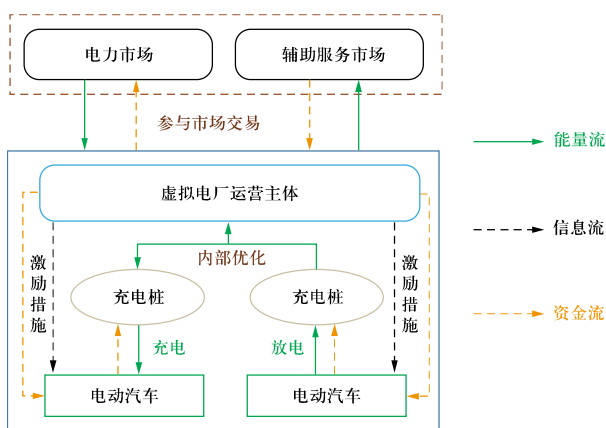


图5 以虚拟电厂为载体间接参与电力市场商业模式

Fig. 5 Indirect participation in electricity market business model with virtual power plant as carrier

### 1) 服务内容。

电动汽车可在虚拟电厂中充当电源和负荷的双重身份：作为负荷可有效减少购电成本；作为电源可获

取额外收益。虚拟电厂运营商可针对此特性提供相应服务。一是通过可再生能源跨省批发-省内分散零售模式为电动汽车用户提供充电服务；二是作为市场主体参与电力批发市场，竞价获得辅助服务。进一步根据辅助服务要求，通过分时电价等激励手段整合电动汽车及其他主体发用电状况，拟合出符合电网需求的负荷曲线响应电网以获取相应的收益。

### 2) 收入来源。

此商业模式下，虚拟电厂作为运营商，其收入主要来源于电动汽车充电电费及服务费、反向卖电以及参与辅助服务市场带来的收益，具体表述如下

$$S_3 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{m=1}^M T_{m,i}(t) P_{m,i}(t) p_c''(t) + S_b + S_f \quad (15)$$

$$p_c''(t) = p_c'(t) + p_w \quad (16)$$

$$S_b = C_b \quad (17)$$

式中： $S_3$ 为虚拟电厂运营商收入； $p_c''(t)$ 为 $t$ 时段虚拟电厂内电动汽车充电费用； $S_b$ 为放电补偿收入； $S_f$ 为虚拟电厂参与辅助服务市场获取的收入。

### 3) 服务成本。

服务成本主要包括：省间购电费用、电动汽车放电补偿、充电桩运维费用、内部资源整合费用、其它成本，具体表述如下：

$$C_3 = C_b' + C_g' + C_y + S_f \times \mu + C_q \quad (18)$$

$$C_b' = \sum_{t=1}^{24} \sum_{m=1}^M T_{m,o}(t) P_{m,o}(t) \times p_b' \quad (19)$$

式中： $C_3$ 为虚拟电厂运营商服务成本； $C_b'$ 为虚拟电厂内电动汽车放电补偿； $p_b'$ 为虚拟电厂内部放电价格； $\mu$ 为辅助服务收益分配比例。

### 3.4 商业模式对比分析

上述3种商业模式具有不同的运营主体，故在电力市场环境下具有不同的需求。商业模式一由电网作为运营主体直接控制电动汽车充放电，一方面能够提升电网运行的稳定性，促进可再生能源消纳；另一方面在电网出现异常状况时，可以更快、更可靠地响应电网，不利之处在于增加了电网运行复杂度。商业模式二由售电公司跨省购买低价可再生能源电力，能够在更大时空范围内促进可再生能源消纳，不利之处在于其可控性较差。商业模式三则是通过第三方运营商进行控制，以间接方式参与电力市场，其优势在于不仅能够充分消纳可再生能源，而且能够弥补商业模式二的不足，与电网实现分层优化调度，显著减轻电网

运行管理压力，不利之处在于其对响应速率和响应稳定性要求较高。

为了对3种商业模式运营的经济性进行准确对比分析，本节以3种模式下运营主体收益最大化为目标函数，同时考虑物理约束条件，构建下述优化模型：

$$\max \pi_n = S_n - C_n \quad (1 \leq n \leq 3) \quad (20)$$

$$\text{s.t} \quad 0.2E_z \leq E_t \leq 0.9E_z \quad (21)$$

$$0 \leq m \leq M_{\max} \quad (22)$$

式中： $\pi$ 表示运营主体的净收益； $S_n$ 表示第 $n$ 个商业模式下运营商的总收入； $C_n$ 表示第 $n$ 个商业模式下运营商的总成本。约束条件（21）表示电动汽车各时段电池剩余容量不低于其最低容量且不高于最大有效容量，并且单位时间段内电动汽车充放电电量不能超过其最大充放电电量。约束条件（22）表示在 $t$ 时段内充放电动汽车总数 $M$ 不能超过最大允许的充放电动汽车总数 $M_{\max}$ 。

### 4 算例分析

本章选取湖南某城市电网日运行情况作为测算案例，其中光伏装机160 MW，风电装机160 MW，火电装机1000 MW，外来特高压输电400 MW，可再生能源占比30%。该地区电网某日负荷、风电、光伏、火电、特高压输电功率曲线如图6所示，其中最大负荷为1450 MW，最小负荷为848 MW。

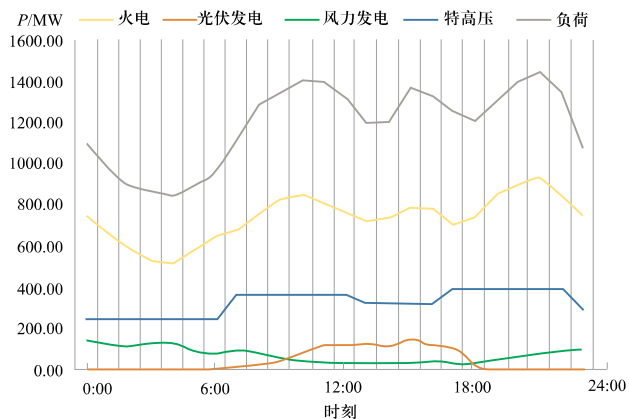


图6 某城市电网功率曲线

Fig. 6 Power curve of an urban power grid

以风光消纳最大、系统经济最优、供电可靠性为目标测算，该城市电网削峰填谷需求如图7和表2所示。

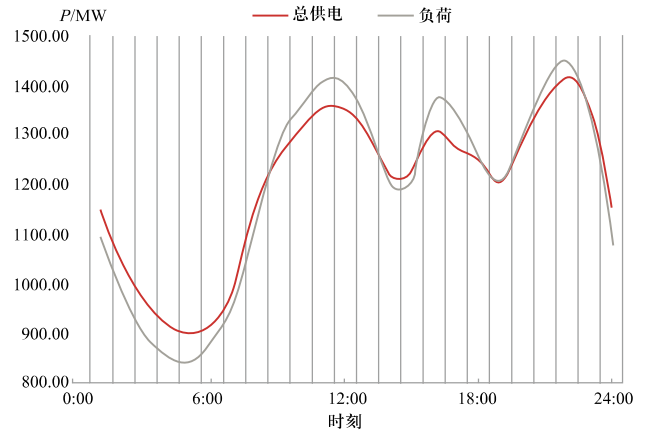


图7 削峰填谷需求曲线

Fig. 7 Peak-shaving demand curve

表2 削峰填谷需求量

Table 2 Peak-cutting and valley-filling demand

时刻	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00
需求/MW	50.7	62.3	62.3	54	60.2	35.7
时刻	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00
需求/MW	38.9	35.5	-32.1	-35.7	-55.3	-48.6
时刻	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
需求/MW	-16.5	16.77	19.15	-61.7	-65.2	11
时刻	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
需求/MW	-6.2	-1.63	-25.8	-36.5	2.78	72.1

本章根据该市电网负荷峰谷分布、可再生能源发电特性和削峰填谷需求设计了电动汽车充放电时序，如图8所示。电网负荷高峰期9:00—11:00和15:00—21:00，而7:00—9:00与17:00—19:00是电动汽车出行高峰阶段，难以接入电网。因此将电动汽车的充电时间段设置为22:00—6:00（次日）、13:00—14:00；放电时间段设置为7:00—11:00、15:00—21:00。

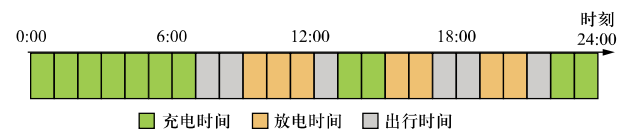


图8 电动汽车充放电时序

Fig. 8 Charging and discharging sequence of electric vehicle

该城市拥有约4000辆比亚迪电动汽车，其属性如表3所示。假设4000辆车均参与电力市场，且每天电动汽车以满电状态（电池容量90%）出行。

表3 电动汽车属性  
Table 3 Electric vehicle properties

型号	电池容量 /kW	充电功率 /kW	百公里耗电量 /kWh	日均行驶里程 /km
比亚迪E6	60	7	20	60

考虑电网可靠运行,同时确保外来电中可再生能源全额消纳,首先设定削峰填谷需求量的30%由电动汽车参与电力市场进行调节,剩余部分采用火电进行调整。进一步根据式(1)~(3)计算电动汽车全天内各时段最大总充放电量,并与电网各时段削峰填谷需求量进行对比,计算结果如图9所示。

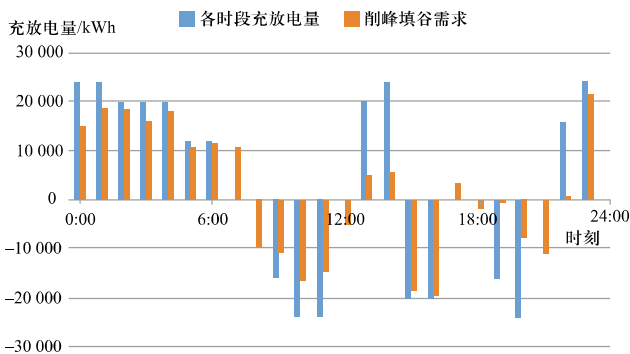


图9 电动汽车各时段充放电量

Fig. 9 Charge and discharge electricity of electric vehicle in different periods

从该图可以看出,电动汽车各时段充放电量均满足电网削峰填谷需求。一方面,可保障电网稳定运行,提高供电可靠性;另一方面,有助于消纳外来可再生能源,促进其大范围内消纳。

该城市电网充放电价格等主要经济参数如表4所示。

表4 主要经济参数  
Table 4 Main economic parameters

类型	价格	类型	价格
充电	0.71元/kWh	尖峰电价	1.28元/kWh
充电服务费	0.8元/kWh	高峰电价	0.95元/kWh
放电	0.16元/kWh	低谷电价	0.32元/kWh
省外可再生能源	0.4元/kWh	调峰成本	0.2元/kWh
省内可再生能源	0.57元/kWh	特高压输电费	0.1元/kWh
运维成本	0.15元/kWh	收益分配比	8%

基于表4参数,运用优化模型式(20)~(22),计算并分析3种商业模式经济性,结果如图10所示。

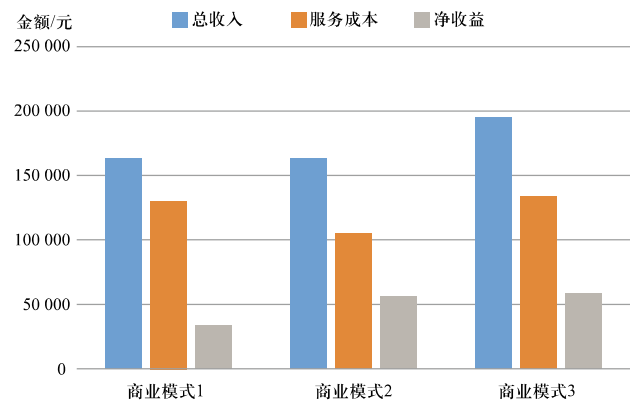


图10 商业模式收入/成本/净收益

Fig. 10 Business model income/cost/net profit

图10给出了电动汽车参与不同商业模式下的收入与成本。商业模式一:电动汽车直接参与电力市场,电网企业收入为163 769.04元,服务成本为129 913.89元;商业模式二:可再生能源跨省批发-省内分散零售,售电公司收入为162 344.34元,服务成本为105 832.35元;商业模式三:以虚拟电厂为载体间接参与电力市场,虚拟电厂运营商收入为194 088.78元,服务成本为135 284.136元。3种商业模式均可以为各市场运营主体带来一定的收益。相比商业模式一和二,商业模式三的经济性最优。这是因为:第一,特高压输电通道承担的400 MW电力大都来自风光电厂,一方面其波动性经过风光水火打捆输送得到有效的管控,另一方面,模式三提出的电动汽车运营策略能够最大程度消纳可再生能源;第二,虚拟电厂参与辅助服务市场也可获取一定收益。其中,4000辆电动汽车除负荷低谷充电满足电网需求外,同时为保障车辆自身需求额外消纳可再生能源约73.5万kWh。在此种模式下,虚拟电厂运营商以特高压技术为支撑,凸显其在购电成本上的优势,使充电价格具有一定降价空间,对于电动汽车用户而言,可以从中获取更多的收益来缓解充电成本及车辆自身损耗成本,从而更高程度地参与电力市场,最终实现加强用户与电网间的友好互动、削峰填谷、促进可再生能源消纳的目的。

## 5 结论

面向能源电力绿色转型重大技术需求,针对现有工作偏重于从微观层面研究电动汽车参与电力交易的

模型及方法、参与电网互动策略的局限性, 本文立足宏观层面研究电动汽车参与电力市场交易的商业模式。首先分析了电动汽车与可再生能源的出力关系, 探索了市场环境下电动汽车的技术经济特性, 分析并设计了电动汽车参与电力市场的基本架构; 进一步分别从电网、售电公司、虚拟电厂3个角度提出了电动汽车参与电力市场的商业模式; 最后, 对3种商业模式经济性进行了对比分析, 结果证明了本文提出的电动汽车参与电力市场的商业模式有助于电网与电动汽车用户形成良好互动, 具有重要的推广应用价值。

需要说明的是, 再好的商业模式也需要有良好的市场机制作为保障。为充分真实反映电动汽车的灵活性价值, 还需进一步从电动汽车参与电力市场的准入条件、充放电价格和用户宣传等方面做以下方面的深入研究。首先, 应明确电动汽车的市场身份及地位, 鼓励将电动汽车纳入电力市场主体中, 并适度降低电动汽车进入市场交易的条件; 其次, 充放电价格也是电动汽车参与市场交易的重要因素, 应加快落实电动汽车充电峰谷电价政策, 减少转供电加价, 降低第三方运营商上游购电成本, 制定合理定价策略; 第三, 加大电动汽车参与电力市场化宣传力度, 增加用户的环保意识, 鼓励用户更加主动参与电力市场, 促进能源电力清洁转型。

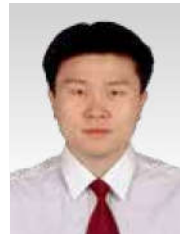
## 参考文献

- [1] 刘敦楠, 王梅宝, 江叶峰, 等. 基于负荷品质梯级利用的快速需求响应市场机制设计[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 295-301.  
Liu Dunnan, Wang Meibao, Jiang Yefeng, et al. Design of rapid demand response market mechanism based on load quality grading utilization[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 295-301(in Chinese).
- [2] 肖俊, 袁炜灯, 陈佳辉, 等. 电动汽车接入下考虑需求响应与网络重构的供电能力动态评估[J/OL]. 电测与仪表: 1-9[2019-06-03].  
Xiao Jun, Yuan Weideng, Chen Jiahui, et al. Dynamic evaluation of power supply capacity considering demand response and network reconfiguration [J/OL]. Electrical Measurement and Instrumentation: 1-9 [2019-06-03] (in Chinese).
- [3] 王皓靖, 王育飞, 张宇, 等. V2G模式下电动汽车的有序充放电策略[J]. 上海电力学院学报, 2019, 35(2): 137-142.  
Wang Haojing, Wang Yufei, Zhang Yu, et al. The orderly charging and discharging strategies of electric vehicles in the mode of V2G [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2019, 35 (2): 137-142 (in Chinese).
- [4] 杨铮, 彭思成, 廖清芬, 等. 面向综合能源楼宇的电动汽车辅助服务方案[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2831-2843.  
Yang Zheng, Peng Sicheng, Liao Qingfen, et al. Electric vehicle auxiliary service scheme for integrated energy buildings [J]. Power System Technology, 2017, 41 (9): 2831-2843(in Chinese).
- [5] 孙杰, 赵国瑾, 刘顺桂, 等. 基于改进时间延迟环节的集群电动汽车参与电网调频的动态特性研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 470-480.  
Sun Jie, Zhao Guojin, Liu Shungui, et al. Dynamic characteristics of cluster electric vehicles participating in grid frequency modulation based on improved time delay link [J]. Power System Technology, 2019, 43 (2): 470-480(in Chinese).
- [6] 武小梅, 谢旭泉, 林翔, 等. 电动汽车提供备用服务的地区电力市场模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 71-76.  
Wu Xiaomei, Xie Xuquan, Lin Xiang, et al. Regional electric power market model for electric vehicles providing standby services [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40 (24): 71-76 (in Chinese).
- [7] 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 electric vehicle agent in the power market [J]. Power System Technology, 2016, 40 (9): 2596-2602 (in Chinese).
- [8] 王浩然, 陈思捷, 严正, 等. 基于区块链的电动汽车充电站充电权交易: 机制、模型、方法[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-12[2019-06-03].  
Wang Haoran, Chen Sijie, Yan Zheng, et al. Charging rights trading of electric vehicle charging station based on block chain: mechanism, model and method [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-12 [2019-06-03](in Chinese).
- [9] 张谦, 史乐峰, 任玉珑, 等. 计及V2G备用服务的交易模式[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 59-67, 219.  
Zhang Qian, Shi Lefeng, Ren Yulong, et al. Transaction mode considering V2G standby service [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32 (31): 59-67, 219(in Chinese).
- [10] 汤伟成, 武小梅, 胡俊灵, 等. 结合电动车的日前市场和实时市场联合优化[J]. 黑龙江电力, 2018, 40(5): 461-466.  
Tang Weicheng, Wu Xiaomei, Hu Junling, et al. Joint optimization combined with the pre-market and real-time market of electric vehicles [J]. Heilongjiang Electric Power, 2018, 40 (5): 461-466(in Chinese).
- [11] 张雯, 李凯, 王男, 等. 电动汽车接入电网多目标交易研究[J]. 山东电力技术, 2017, 44(9): 6-13.  
Zhang Wen, Li Kai, Wang Man, et al. Research on multi-objective transaction of electric vehicle access to power grid [J]. Shandong Electric Power, 2017, 44 (9): 6-13(in Chinese).
- [12] Kempton W, Letendre S. Electric vehicles as a new power source for electric utilities[J]. Transportation Research Part D23, 1997, 2(3): 157-175.
- [13] Carthy D M, Wolfs P. The HV system impacts of largescale



- electric veicle deployments in a metropolian area[C]//20th Australasian Universities Power Engineering Conference. Christchurch: IEEE, 2010: 1-6.
- [14] 程亦直, 张沛超. 配电网中电动汽车的实时滚动交易式充电管理[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-12[2019-06-03]. Cheng Yizhi, Zhang Peichao. Real-time rolling transaction charging management of electric vehicles in distribution network [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-12 [2019-06-03] (in Chinese).
- [15] Kempton W, Tomic J. Vehicle to grid implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy[J]. Power Sources, 2005, 1(144): 280-294.
- [16] 陈亦杰, 刘故帅, 张忠会. 考虑电动汽车群和新增实体的电力市场多方交易策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 33-40. Chen Yijie, Liu Gushuai, Zhang Zhonghui. Study on multi-party trading strategy in power market considering electric vehicle group and new entities [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46 (13): 33-40(in Chinese).
- [17] Tang D, Wang P. Probabilistic modeling of nodal charging demand based on spatial-temporal dynamics of moving electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7 (2): 627-636.
- [18] Clement-Nyns K, Haesen E, Driesen J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1) : 371-380.
- [19] 刘文琼. 电力市场下发电商报价行为的随机分布模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [20] 陈猛. 浅论工业经济的科学发展和和谐发展[J]. 黑龙江科技信息, 2009(25): 101. Chen Meng. On the scientific development and harmonious development of industrial economy [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2009 (25): 101(in Chinese).
- [21] 龚长武, 张有兵, 翁国庆. 插电式电动汽车入网体系框架研究[J]. 机电工程, 2012, 29(8): 961-965. Gong Changwu, Zhang Youbing, Weng Guoqing. Research on the framework of plug-in electric vehicle access system [J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 2012, 29 (8): 961-965(in Chinese).

收稿日期: 2019-07-17; 修回日期: 2019-08-05。



刘敦楠

作者简介:

刘敦楠(1979), 男, 副教授, 研究方向为电力经济运行、电力市场、能源互联网, E-mail: liudunnan@163.com。

王梅宝(1995), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场, E-mail: ncepu\_meibaowang@163.com。

(责任编辑 张宇)

## “泛在电力物联网”专栏征稿启事

泛在电力物联网是数字革命在能源电力领域迅猛发展的最新体现, 是大数据、云计算、物联网、移动互联网、人工智能、区块链等现代信息技术、先进通信技术在电力系统的深度实践。建设泛在电力物联网, 拓展在智能电网之外的数据采集, 破除电力系统与其它非电能源系统、能源终端社会的信息壁垒, 能够为能源互联网的规划建设、生产运行、经营管理、综合服务、新业务新模式发展等方面提供充足有效的信息和数据支撑, 促进能源系统高效、清洁、低碳发展。

为展示泛在电力物联网领域研究的最新进展, 促进能源领域系统层面的多学科交叉融合创新, 推动全球能源向互联互通、清洁低碳、高效安全的可持续方向发展, 《全球能源互联网》设立“泛在电力物联网”专栏。真诚欢迎广大专家、学者、技术人员踊跃投稿, 来稿注明“泛在电力物联网”专栏。

### 专题征稿范围 (包括但不限于)

- 1) 融合泛在电力物联网的信息-物理-社会系统基础理论和方法;
- 2) 基于泛在电力物联网的能源(电力)市场交易机制与商业模式;
- 3) 泛在电力物联网背景下的低碳综合能源系统规划及运行;
- 4) 泛在电力物联网背景下的能源(电力)应急防御;
- 5) 基于泛在物联网的交通电气化规划及运行;
- 6) 泛在电力物联网与智能电网信息交互和融合安全;
- 7) 大数据、云计算、人工智能等技术在泛在电力物联网中的应用。