

基于区块链技术的去中心化电动汽车V2G新模式

康 慨¹, 施 念¹, 王艳鹏¹, 张云龙¹, 林湘宁², 汪 涛², 李正天², 潘帅琪³

(1. 湖北省电力勘测设计院有限公司, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

3. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:从共享经济的角度出发,提出一种基于区块链技术的去中心化的车辆到电网(V2G)新模式。利用区块链技术和V2G技术天然的互补性,挂网的电动汽车以合理的价格将多余的电量包装成期货商品,通过点对点技术将售电信息扩散到整个网络;同时,需要紧急充电的电动汽车购买充电期间最低价位的期货商品并达成临时合约,待电网对其进行安全校验后正式达成交易,并以智能合约的形式存储电力交易信息,到期时完成价值的自行转移,实现电动汽车电力市场交易双方自行匹配、双边交易直接达成的目的。基于此,建立可行的交易理论模型。基于2个社区共150辆电动汽车的仿真分析验证了所提交易模式的经济性和可行性。

关键词:区块链;V2G;期货合约;共享经济;过网费用

中图分类号:TM 73;U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202108018

0 引言

电动汽车,尤其是纯电动汽车,因具备优良的节能环保潜力而受到世界各国政府和车辆制造商的普遍重视,近年来其保有量持续增长,未来有可能成为占社会主导地位的交通工具形态^[1]。但大量电动汽车接入电网将给电网带来大规模的负荷增长,在缺乏充电协调的情况下对电网安全运行产生的负面影响将不可忽视。文献[2]表明电动汽车充电负荷主要集中在电网负荷高峰时段,在时间分布上极不均衡;文献[3]指出现有的电动汽车充电设施配建比例失调,充电负荷空间分布差异明显;文献[4]表明电动汽车充电负荷占总负荷比重大,无序的电动汽车充电将进一步扩大配电网负荷的峰谷差;文献[5]指出电动汽车并网会增加电网的运行控制难度,影响电能质量。随着电网中新能源(大部分具有反调峰特性)渗透率的不断上升,上述问题的严重性将更为突出。

利用峰谷电价价格机制引导和调控电动汽车的接入时间,是一种有效缓解电网运行压力的经济手段:文献[6]以最小化充电成本与总负荷方差、最大化日负荷利益率为目标函数,提出一种分布式电动汽车有序充放电管理策略,无需集中式通信系统实时监测与控制,而由充电桩自主决策有序充放电计划;文献[7]综合考虑用户需求和电网负荷水平,以削峰填谷为目标,采用启发式算法动态求解电动汽

车的分时电价时段;文献[8]考虑充电站的运行状态和电动汽车用户的充电习惯,提出一种基于新电价机制激励用户调整充电时间的有序充电策略。但由于一些硬件条件限制或是刚性出行需求,价格机制并不能彻底解决电动汽车引起的电网运行压力。例如,在人口密集的大都市,居民区,尤其是占比极大的老旧居民区,停车位和充电桩配置数量均极为有限,无法保证大部分车辆在夜间并网^[9]。实际上,在日间负荷高峰时段接入电网仍是相当数量电动汽车的刚性需求。在峰谷电价下,电网的调峰压力会得到一定程度的缓解,但却无法从根本上得到解决。

利用数量庞大的电动汽车提供备用服务的车辆到电网V2G(Vehicle-to-Grid)技术,是一种被广泛研究的可能解决方案^[10],且随着技术的发展,电池的循环寿命不断提升,电池价格持续走低,该方案在未来将具备越来越强的可行性。但现阶段提出的V2G模式的实现方法均存在一定的问题。采用集中控制、统一调度的V2G策略,往往需要依赖第三方供应商或者电网进行统一管理,代表电动汽车群体参与市场竞争,其主要面临4个问题:大量电动汽车接入将导致控制中心运行成本高、运行效率低、决策耗时长,难以满足配电网实时安全运行的需求;控制中心与电动汽车之间存在信任问题,难以保证有序充电的公平性、透明性与信息对称性;直接控制电动汽车的做法忽略了用户个体意志,可能引起用户反感;中心机构容易导致信息安全风险,危害交易安全及参与主体的隐私安全。采用分区、分层模式虽然可以缓解交易压力,但是无法从根本上解决数据不透明的问题^[11]。采用自治式的V2G策略,在没有全局性的交易市场将原子化的电动汽车聚合起来的情况下,因电动汽车储能容量有限、行为特征难以约束与

收稿日期:2021-04-18;修回日期:2021-06-27

基金项目:中国电力建设股份有限公司科技项目研究项目(DJ-ZDXM-2019-24)

Project supported by the Science and Technology Research Project of China Electric Power Construction Co., Ltd. (DJ-ZDXM-2019-24)

预测、彼此之间交易的支付信任成本高等问题,单辆电动汽车将无法得到有效利用^[12]。上述模式均很难避免由于交易成本高昂或者资源利用率低下而导致 V2G 潜在市场萎缩的局面。

近年来,在能源互联网的环境下,作为一种分布式共享数据库的区块链技术得到了广泛关注^[13]。已有学者对区块链应用于电动汽车充电进行了初步研究。文献[14]考虑不同充电运营商和供电企业存在充电信息与交易方式不统一的情况,制定一种基于联盟链的电动汽车交易模型,以实现充电服务的互联。文献[15]为促进售电侧开放背景下电动汽车与电网的协调发展,设计一种区块链智能合约技术下的电动汽车入网竞价机制。在此基础上,文献[16]提出基于区块链技术的充电桩共享方案,保证了参与记账的多方可信任。文献[17]提出一种基于合约订单的电动汽车电能分布式交易模型,并建立基于最大目标函数和信誉值的订单冲突解决机制。文献[18]引入区块链惩罚积分,搭建基于区块链的电动汽车出行诚信度模型,在此基础上建立电动汽车双层优化调度模型。文献[19]设计基于以太坊区块链的充电权分配与交易平台及智能合约,确保配电网的安全运行及充电权交易的公开透明与高效智能。文献[20]基于区块链技术,提出去中心化的微电网电能交易系统框架,设计用于实现电能交易的链码并清楚阐述整个交易流程。但上述文献主要着眼于电动汽车群体与电网交换能量的 V2G 模式,而较少讨论电动汽车个体间直接交易(车辆到车辆 V2V (Vehicle-to-Vehicle))的可行性,容易忽视个体意愿的差异性,从而难以满足买卖双方的主观意愿。此外,当前动力电池的价格仍处于高位状态,严重限制了 V2G 模式的互动深度和实际效果(例如 V2V 模式几乎不可能实现)。在电池价格不断降低的背景下,未来可能出现新的 V2G 交易模式。

综上,本文首先提出一种基于区块链技术的去中心化 V2G 交易新模式,分析电动汽车间、电动汽车-电网双向的自治协同交易机制;然后,在此基础上提出电动汽车电量上网定价模型以及去中心化市场交易模型,旨在实现个体利益驱动下的多主体自发性市场交易行为;最后,通过仿真分析论证该交易模式的可行性以及共享经济的普遍获益性。

1 去中心化 V2G 交易新模式

据统计,绝大多数汽车(包括电动汽车)在一天中的 96% 的时间下都是被闲置的^[21],开发电动汽车储能潜力的 V2G 技术有望显著提高闲置资源的利用率。双向充电桩将大量停在泊位上的闲置电动汽车接入电网,能够克服地域上的限制,将分散的个体统一纳入电力市场,见附录 A 图 A1。本文提出去

中心化的 V2G 新模式,即尝试借助互联网技术打破电动汽车之间的地理阻碍,实现电动汽车群体内部、群体之间以及电动汽车群体与电网信息流、能量流的自由交互。所谓去中心化,就是指借助区块链技术,将电力交易与交易信息的管理和记录交由电力市场的参与者完成,不再专门设置中心机构对交易情况进行集中管理。基于去中心化的电动汽车 V2G 交易体系架构可分为数据层、网络层、共识层、智能合约层和应用层:数据层以 Merkle Bucket 树及区块链表的数据结构将交易数据存储在 LevelDB 或 CouchDB 中;网络层选择 HTTP/2-based P2P 协议作为网络传输协议,使节点监听验证广播的新区块或新交易是否有效;共识层采用实用拜占庭容错算法;智能合约层封装了使用 Go 语言编写的电动汽车 V2G 交易智能合约;应用层支持具有转账交易功能的电动汽车充放电应用程序。

去中心化的 V2G 技术参与者一共有三方,即电动汽车、电力商业机构(如售电商)以及电网(专指传输网络),三者均设置为共识节点。合约的发布与生成模式如图 1 所示。由图可见,当电力商业机构或电动汽车有可分享/出售的电量时,他们将根据自身情况在区块链平台上发布电力商品,汇集到供应池中,并提供服务时段、服务能力以及服务价格等商品信息,通过点对点 P2P(Point-to-Point)网络传输到每个节点。与此同时,电力需求者(电动汽车或电力商业机构)实时搜索供应池,寻找池中与自身需求相匹配且价格最为低廉的电力商品,希望以较低的购电成本达成初步交易意向。

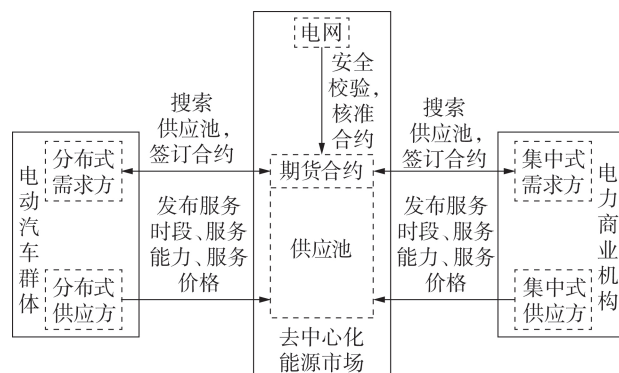


图1 合约的发布与生成模式

Fig.1 Contract release and generation mode

但完全按照能源市场达成的电力交易可能不符合网络的安全约束条件,因此需要对达成的初步交易意向进行安全校验。在去中心化的 V2G 新模式中,由电网提供安全校验服务。根据达成的临时交易以及线路参数,电网计算出关联线路潮流,并与对应的安全阈值进行对比,判断交易是否满足安全要求,一旦安全校验通过,达成的交易将以智能合约的形式记录下来,每一方需要履行的义务及合约执行

的判定条件均被存储在内,并通过P2P网络扩散到全网的各个节点。通过相互通信,所有节点对已经交易的合约达成共识,相应的期货商品也自动退出供应池。

随着时间的推移,区块链系统对合约执行条件进行实时判断。当所有判定条件都满足时,即认为到达期货合约成交的时间点,区块链系统将自动强制执行合约条款。此时,电网开始向合约的供需双方提供计量服务并收取一定的费用,并且以区块链货币(如数字化人民币)的形式进行结算。智能合约执行模式如图2所示。由图可见:在P2P网络中的2个相关节点执行合约时,电能从售电节点经过双向充电桩注入电网,并传输至购电节点;而购电节点提供区块链货币,分别支付售电节点的售电费用以及电网的安全校验、计量、过网费用,完成价值的对等互换。

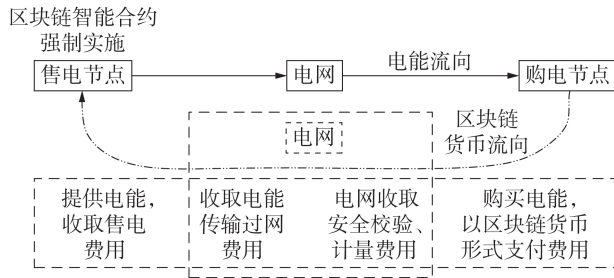


图2 智能合约执行模式

Fig.2 Execution mode of smart contract

借助区块链技术的V2G新模式,电力市场参与者对电力交易进行分工化的自行管理、自行配对,在机制上能够实现可信任与自组织,节约了系统成本,提高了合约执行的效率,在实际应用中具有较高的可行性。

2 交易理论模型

2.1 电动汽车售电定价模型

2.1.1 电动汽车售电电价

电动汽车的售电电价由售电成本和预期净利润组成,售电电价 p_{sale} 可表示为:

$$p_{\text{sale}} = C_1 + C_2 + R_e \quad (1)$$

式中: C_1 为电能采购成本,反映的是该电动汽车购进所售电能而产生的费用; C_2 为因蓄电池充放电寿命损耗而发生的费用; R_e 为售电利润预期。

在市场交易行为中,作为一个理性人,不妨令售电的电动汽车在制定售电利润预期时遵循正态分布:

$$R_e \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (2)$$

式中: μ 、 σ 分别为利润的数学期望和标准差。

2.1.2 交易服务费用核算

买卖双方在进行电力商品的交易时,除卖家所

得,还将发生一定的交易服务费用,本文中相应的交易服务费用全部由买家承担。一般而言,交易服务费用包含安全校验费用 p_{sec} 、计量费用 p_{me} 和过网费用 p_{net} 。为鼓励能量的就地平衡,当电动车间进行跨区交易时,在收取过网费用的同时还将收取较高的跨区交易服务费用 p_{reg} ,以避免大量跨区交易引起的大规模潮流转移问题。因此,对于电动汽车 i 、 j ,发生在其间的交易服务费用可核算为:

$$p_{\text{trans}} = \begin{cases} p_{\text{sec}} + p_{\text{me}} + p_{\text{net}} & i, j \in w_A \\ p_{\text{sec}} + p_{\text{me}} + p_{\text{net}} + p_{\text{reg}} & i \in w_A, j \in w_B \end{cases} \quad (3)$$

式中: p_{trans} 为电网支付的服务费用; w_A 、 w_B 为电动汽车所在区域。

2.2 电动汽车市场交易模型

2.2.1 电力期货发布

设电动汽车入网时刻为 t_c ,入网电量为 W_c ,电动汽车离网时刻为 t_g ,离网电量为 W_g 。当 $W_c > W_g$ 时,电动汽车电量充足,能够达成电力期货合约的小时数为:

$$n = \left\lceil \frac{W_c - W_g}{P_{\text{discharge}}} \right\rceil \quad (4)$$

式中: $P_{\text{discharge}}$ 为出售电力时的电动汽车放电功率;“ $\lceil \cdot \rceil$ ”表示取整。为简便起见,不考虑快充、快放的场景,假设电动汽车均以固定的速率充、放电。

结合式(1)~(4),售电的电动汽车将以价格 p_{sale} 出售(t_c, t_g)时段内 n 个任意时刻的期货商品。

实际上,若市场中电动汽车电量充足、挂网时段时间尺度大且存在跨越峰-平-峰阶梯时区的现象,电动汽车就可能依次出售高、低价合约,以谋求在无风险的情况下获取更多的利润。具体而言,在电网电价较高的时段,电动汽车以较低的价格出售多余电量,待合约全部售罄后,若自身电能存量满足继续售电的要求且在计划补充电量时段(如平时段)能够以低于售电收入的成本补充电量,则以价格 p_{sale}^h 继续出售高价合约,赚取差价。此时的电量 W_t 满足以下约束:

$$W_t \geq W_{\min} + P_{\text{discharge}} \Delta t \quad (5)$$

式中: $W_{\min}$ 为电动汽车电池的电量下限; Δt 为优化时间步长。

$$p_{\text{sale}}^h = p_f + C_2 + R_e \quad (6)$$

式中: p_f 为计划补充电量时区的电网电价。

2.2.2 需求匹配模式

售电方借助区块链平台发布商品,供应池内存在多个不同时段、不同价格的期货合约。如果按照报价高低对某一时段的合约人为进行排序,则可以得到报价曲线,如附录A图A2所示。其中价格高于对应时段电网电价的期货商品,是部分报价较高或计及过网费用等附加费用后的跨区合约,显然,该合

约在本地不具有竞争优势。

电量紧缺的电动汽车根据在网时刻自主选择充电时段,并以充电成本最小化为目标搜索供应池中同一时段价格低于对应电网电价的期货商品。需求模式匹配示意图如图 3 所示。一旦发现供应池中存在符合上述条件的期货商品,购电方即刻与其中价格最低者签订合同。若交易满足线路安全约束,则合约正式达成,相应商品退出市场,搜索工作也在时间上循环搜索、时序上顺次递延,直到所有时段均签订合同;否则,电动汽车继续搜索供应池,谋求签订低价合约,直到该时段到来购买电网电量弥补功率缺额。

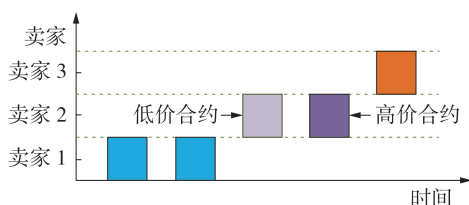


图 3 需求模式匹配示意图

Fig.3 Schematic diagram of demand pattern matching

2.3 电力商业机构行为模型

2.3.1 根据电力配额生成售电合约

受火电机组运行特性的制约(最低运行功率为 300 kW,额定功率为 1 600 kW),电网的调节能力十分有限。电网售电合约发布原理图如图 4 所示。由图可见:对于风电大发、常规负荷消纳能力不足的低谷时段,电网能够接受的风电并网功率十分有限,在 23:00 至次日 05:00 可能出现大规模弃风现象;对于风电出力较小、常规负荷功率需求旺盛的高峰时段,电网承载新负荷的调整空间被严重挤压,在 11:00—12:00 以及 19:00—20:00 可能存在功率供应不足的风险。理论上,为安全起见,电网通过短时预测未来风电及常规负荷功率,计算系统功率裕度,并在此基础上发布裕度之内的售电合约。

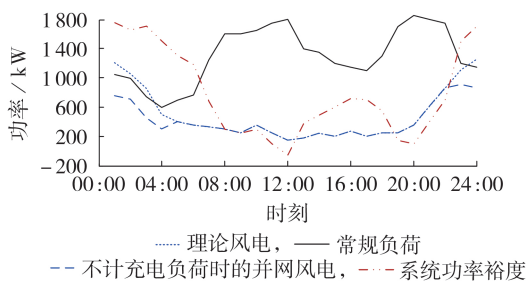


图 4 电网售电合约发布原理图

Fig.4 Principle diagram of power sales contract release for power grid

2.3.2 紧急调峰服务合约

实际上,由于风电及常规负荷的预测存在一定的功率误差,在某些时段风电出力较小、负荷需求较

大时,电网将面临电力供给不足、短时功率缺额的不利局面。在该情况下,电网将停止接单,并转而购买供应池中部分或全部的剩余售电合约进行紧急调峰。在调峰尺度较小、部分合约足以满足要求时,根据市场价格出清的机制,电网依次购买对应出清价格以下的全部合约;在调峰尺度较大、所有合约都不能填补功率缺口时,电网在购买全部合约的基础上将继续寻找其他调峰服务。

2.4 安全校验方法

当未来电动汽车渗透率显著上升时,将有必要校验 V2G 模式(尤其是 V2V 模式)的安全性。当临时交易达成后,电网要根据交易信息进行安全校验。设: N_b 为系统节点数; N_L 为系统线路数; M 为交易数; d^m 为交易 m 中各节点的负荷,其为 N_b 维向量; g^m 为交易 m 中各节点的发电量,其为 N_b 维向量; X 为 $N_L \times N_L$ 维对角阵,对角元素为 $1/x_{ij}$,其中 x_{ij} 为线路 ij 的电抗; A 为 $N_L \times (N_b - 1)$ 维矩阵,其为去掉了松弛节点相应列的降阶节点关联矩阵; q^m 为除松弛节点外交易 m 的注入向量(发电量减去负荷),其为 $N_b - 1$ 维向量; z^m 为交易 m 的线路潮流向量,其可由直流潮流公式^[22]得到,如式(7)所示。

$$z^m = XA(A^T XA)^{-1} q^m \quad (7)$$

比较计算结果与对应线路的潮流极限值:若计算结果满足线路潮流的安全约束,则买卖双方签订的临时合约正式达成;否则,立即终止合约,同时释放相应的期货商品,并进入下一轮的期货交易^[23]。

需要指出的是,目前区块链的计算能力及响应速度有限,计算效率可能达不到要求。然而,目前大力研究的增加区块大小、开发分片和侧链等技术,有望提高计算效率;本文所述机制大量涉及未来时段的交易,如在 10:00—11:00 预先分配交易在 11:00—12:00 内的充/放电权,电网安全校验或许可提前执行;本文所述交易机制仅涉及与能源交易相关的节点,可以部署在挖矿难度可调的私有链上,能有效提高区块链交易速度;我国正在大力发展云计算和边缘计算,可给基于区块链的电网安全校核提供新的助力。

3 可达成的交易类型

3.1 电动汽车间电能共享

V2G 新模式在不妨碍个体出行计划的同时,能够将闲置的电动汽车资源转化为盈利工具,充分调动个体参与的积极性。电动汽车群体间通过自发出售电力商品形成电力交易市场,借助区块链平台进行平等交易、买卖自由匹配,在进行价值转移的同时,完成电量资源的重新配置,这在一定程度上实现了群体内部电能共享、自给自足的目的。值得注

意的是,V2G新模式改变了电动汽车群体充电负荷24 h时间尺度的分布形态,在原有峰-谷负荷的基础上进行削峰填谷,完成了大规模峰谷负荷的转移,此消彼长的态势缓解了电网日常功率调节的运行压力。

3.2 电动汽车充电时段优化

为了防止电动汽车群体夜间扎堆充电导致该时段反调峰行为显著以及其他时段大规模弃风的源荷极端不平衡现象发生,电网采取基于合约发放控制的精细化充电功率管理。在消纳富余风电、均摊火电运行压力的思想指引下,通过控制不同时段充电合约的发布数量,人为引导需求侧电动汽车群体的充电行为,使充电负荷在谷时段时间尺度上整体呈错落有致的排布格局,实现系统源荷的再平衡。

3.3 电网旋转备用服务供应

基于区块链技术的V2G新模式,为电力商品提供了平等、自由的交易平台。作为市场参与者,电网也具有平等购买供应池中电力商品的权利。在该情况下,电动汽车可在功能上完全替代传统的旋转备用,为电网紧急调峰服务提供可选择的来源。实际上,汽车电量的售电价格普遍较低,就地购买供应池内全部或部分的售电合约远比专程购买调峰或调频服务花费低。电网紧急调峰需求在获得响应的同时,购电成本也得以大幅削减,电网利益得到进一步的保障。

3.4 其他可扩展交易类型

本文提出的基于区块链技术的V2G新模式具有极好的兼容性和可扩展性,在能源网的发展格局下应用潜力巨大。

在输配分离的电力市场改革趋势下,家用分布式光伏发电系统将获得进一步发展。在该场景下,用户作为典型的产消者,当新能源出力不足时需要从外界进行购电填补能量缺口,在新能源富余时段则要积极寻找其他消费者外销过剩产能。借助区块链技术,具有家用分布式光伏发电系统的用户能够同外界形成紧密联系,轻松完成能量流、信息流的双重交流,实现多渠道、多层次、全方位的能源网主体交互的目的。

考虑到风、光等新能源发电具有波动性与不确定性,一方面继续深入挖掘电动汽车电池储能的物理特性,对电网进行更深层次的服务,例如,可以利用电池的快速响应能力,平抑电网功率波动,降低电网谐波含量,大幅提高电力系统的电能质量。另一方面,扩大电力市场上期货商品的范畴,积极同风电场等新能源发电单位签订电力期货合约,将购买的大规模期货商品在特定时段售予电网,在存在套利空间的同时,也有助于降低各方的交易风险,促进市场活跃程度的多样性。

4 算例分析

本文在实验室环境下,将交易链码发布至超级账本的Fabric网络,并通过Java SDK为本地创建客户端,作为交易平台,模拟电动汽车V2G交易场景进行仿真测试。假设2个社区分别包含70、80辆电动汽车,电池容量为40 kW·h,规定每辆电动汽车的最大充、放电功率分别为10、5 kW,充、放电效率为0.9。按照工业电价用电分时电价:谷时段为22:00至次日06:00,电价为0.4元/(kW·h);峰时段为06:00—12:00以及19:00—22:00,电价为1.5元/(kW·h);平时段为12:00—19:00,电价为0.9元/(kW·h)。根据文献[24]中的电动汽车充电负荷,使用蒙特卡洛抽样方法模拟每辆电动汽车的负荷需求。

考虑到技术进步,电动汽车电池充放电损耗费用设为0.3元/(kW·h)。设不跨区时交易服务费用 $p_{\text{trans}}=0.1$ 元/(kW·h),跨区时 $p_{\text{trans}}=0.2$ 元/(kW·h)。

4.1 典型电动汽车个体行为分析

基于上述模型的电动汽车典型个体行为如表1所示。

表1 电动汽车典型个体行为

Table 1 Typical individual behaviors of electric vehicles

典型个体	日间在网时段	入网电量 / (kW·h)	离网电量 / (kW·h)
1	07:00—17:00	30	10
2	09:00—17:00	3	35
3	09:00—12:00	35	5
4	16:00—20:00	1	40

图5展示了典型个体1(早九晚五型购买者)行为图。由图可见,典型个体1在夜间(22:00至次日02:00)充电,07:00到达单位,预计17:00驶离。由于电动汽车电量充足,典型个体1首先以低价出售在网期间任意4 h的期货商品。经过电力市场的运作,电能需求者分别购买07:00—08:00、08:00—09:00、09:00—10:00、10:00—11:00时段的售电权。低价合约全部售罄后,考虑到电能尚有存量,典型个体1以高于平时段、低于峰时段的电网电价继续发布1 h的高价合约,在11:00成功交易。余下时段内典

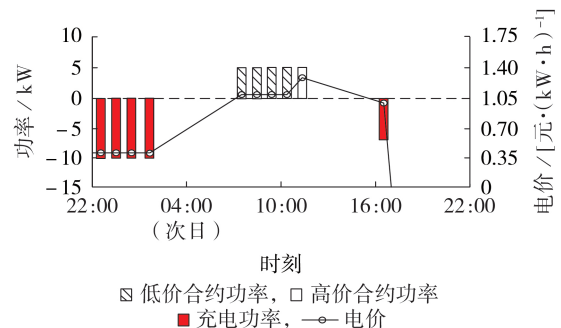


图5 典型个体1行为图

Fig.5 Behavior diagram of Typical Individual 1

型个体1始终未能搜索到供应池中标价较低的售电合约,在16:00—17:00向电网购买电力,满足17:00驶离时刻的电量要求。

图6展示了典型个体2(断续在网型购买者)行为图。由图可知,典型个体2在00:00—04:00进行充电,电池电量充裕,在09:00—12:00挂网售电,并以1.2元/(kW·h)的价格成功出售2h电量,随后驶离。19:00时刻个体2继续挂网运行,并且以0.9元/(kW·h)的价格继续出售未来3h的期货商品,借助V2G交易平台的自动匹配,典型个体2依次签订19:00—20:00、20:00—21:00、21:00—22:00的期货合约,并售电成功。

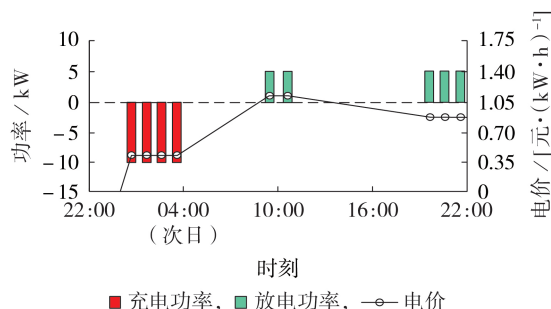


图6 典型个体2行为图

Fig.6 Behavior diagram of Typical Individual 2

限于篇幅,典型个体3(早九晚五型购买者)和典型个体4(断续在网型购买者)的行为情况见附录B。

4.2 电动汽车群体间交易特性分析

1)不同时刻可提供交易的汽车数(06:00—22:00)。

合约功率分布如图7所示。受价格选择规律动机的影响,电动汽车不会购买供应池中报价高于同时刻电网电价的合约,因此在06:00—22:00合约功率始终不小于总交易功率,随着汽车不断挂网和驶离,二者之间的差距随之扩张和紧缩,在06:00—22:00时间尺度上不断波动,但总体上呈现扩张-紧缩-扩张的运行趋势,与总交易功率反映的在网电动汽车数量一致。

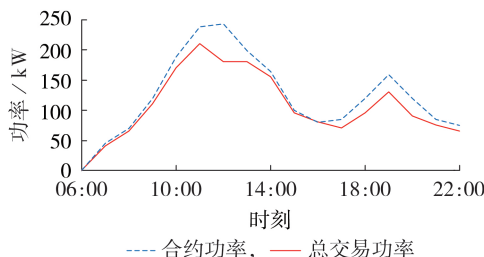


图7 合约功率分布

Fig.7 Power distribution of contract

2)不同时刻的充电需求(06:00—22:00)。

电动汽车充电需求如图8所示。在平时段

(12:00—19:00),实际充电需求大于固有充电需求,而在峰时段(06:00—12:00以及19:00—22:00)二者完全吻合。其原因在于,V2G新模式改变了电动汽车个体的充放电行为,有利可图促使个体在峰-平-峰时间尺度上腾挪电量赚取价差:峰-平时序时电动汽车个体在峰时段高价出售存量、平时段低价补充电量,平-峰时序时电动汽车个体在平时段低价存储电量、峰时段高价售电。

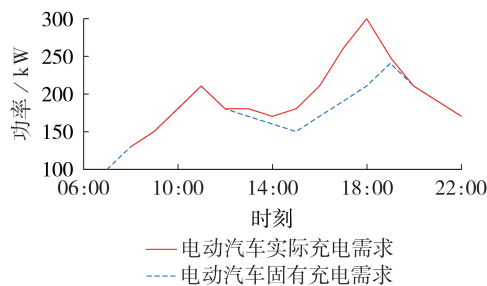


图8 电动汽车充电需求

Fig.8 Charging demand of electric vehicles

3)真实发生的交易数(06:00—22:00)。

基于个体趋利避害的动机,电动汽车在谷时段停止交易,见附录C图C1,而在其余时间电动汽车的交易情况不同,但在赚取差价的利益驱动下,交易额始终大于0,整体上呈现峰-平-峰的分佈格局,并与电网负荷时段分区的划分基本对应,抵扣了对应时刻理论充电负荷的功率需求,缓解了电网的供电压力,也从侧面解释了图4中实际交易功率的分佈形态。

在总交易单数中,跨区的电量交易大部分发生在峰时段,仅有少量存在于平时段。其原因在于,计及过网费用等附加成本的期货合约领先电网电价的优势空间被大幅挤压,竞争力遭到严重削弱,跨区报价很容易超过平时段电网电价,只有少量报价较低且在本地未被及时签订的期货合约,才能被本地成功购买,而在峰时段,由于电网电价较高,跨区合约相对有较大的报价空间,本地购买成功的概率大幅增加。

4.3 V2G模式下的电动汽车-电网间交易

1)夜间充电合约控制(22:00至次日06:00)。

受生活作息规律的影响和电网峰谷电价的引导,有相当部分电动汽车在谷时段泊车充电,因此,可将电动汽车视为可转移负荷,对其进行灵活调度。夜间谷时段售电商放出合约数如图9所示。在风电+火电最小出力-常规负荷大于0的22:00至次日05:00,首先完全按照该时段富余功率的大小发放基本充电合约,即将部分充电汽车作为基荷实现风电的完全消纳。在此基础上,权衡剩余未充电汽车数量以及22:00至次日06:00火电机组原有的运行压力,控制售电合约的发布时机。针对22:00至次日

05:00时段暂时处于300 kW出力下限的火电机组,为平均分摊额外的充电负荷,将其所有时段的运行功率均上调至370 kW,并发布与上调功率对应的充电合约;针对05:00—06:00为填补功率缺口火电出力已经增加至420 MW的系统运行状态,充电合约发布数下降为0。由此实现22:00至次日06:00时间尺度上源荷最大限度的均衡。

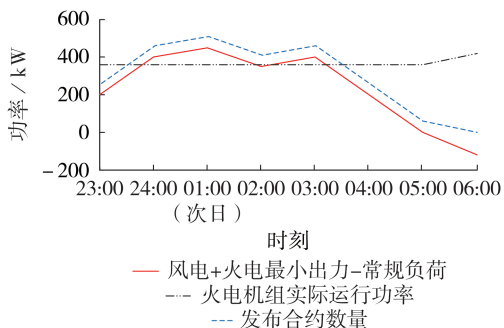


图9 夜间谷时段售电商放出合约功率

Fig.9 Contract power released by electricity sellers during night valley period

2) 日间旋转备用服务(06:00—22:00)。

2次日日间旋转备用服务交易如图10所示。在11:00—12:00电网需要5家单位电能进行紧急调峰,V2G新模式为电网购买紧急调峰服务增加了可选择的渠道。由于市场上传统调峰服务费用高达2.0元/(kW·h),受市场价格选择机制的影响,电网转而购买供应池中价格相对低廉的售电合约。按照从低到高的价格依次搜索相应的合约存量,电网最终购买对应1.0、1.1、1.2、1.3元/(kW·h)价格数量分别为1、4、3、2的10个合约,满足了电量要求。

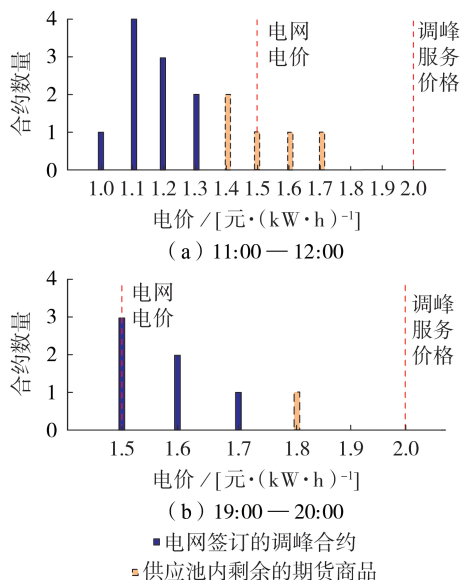


图10 2次日日间旋转备用服务交易

Fig.10 Two service transaction of spinning reserve during daytime

同理,在19:00—20:00电网需要3家单位电能进行紧急调峰,此时供应池内已无低于电网电价的合约可供购买。但较之市场上传统的2.0元/(kW·h)调峰服务价格,供应池内的合约价格仍然低廉。电网购买对应1.5、1.6、1.7元/(kW·h)价格数量分别为3、2、1的6个合约,满足用电需求。这看似是高买贱卖,实则是一种最经济的保全负荷的方式。

3) 电动汽车-电网间功率交换。

采用去中心化的V2G新模式,全天时间尺度内的充电汽车负荷形态得到很大改观,实现整体上的削峰填谷,见附录C图C2。具体而言:谷时段电动汽车负荷分布错落有致,呈现先递增后递减的趋势,在22:00至次日04:00充电需求旺盛、充电负荷功率大幅抬高,在04:00—06:00负荷略低于原有用电需求;峰时段电动汽车用电需求锐减,削峰效果显著,缓解了电网供电压力,甚至在11:00—12:00为电网中5家单位提供调峰能量;平时段负荷在总体上呈现波动趋势,其原因在于,去中心化的V2G新模式给参与者提供了盈利机会,改变了电动汽车的充放电行为,在13:00—16:00部分电动汽车供电,抵消了部分理论用电需求,而在17:00—18:00发布高价合约的电动汽车补充电量,抬高了电网的负荷功率,导致电动汽车实际购电功率略高于理论用电功率。

4.4 交易服务费用和峰、谷、平时段电价差异对交易行为的影响

1) 电池充放电损耗费用对交易行为的影响。

本文采用的0.3元/(kW·h)是考虑技术进步后的电池充放电损耗费用,但目前电池充放电损耗费用为其2倍以上。为探究电池充放电损耗费用对交易行为的影响,以本文采用的0.3元/(kW·h)为基准1,默认电网电价、交易服务费用不变,控制电池充放电损耗费用在[0,2]元/(kW·h)之间变动,观察交易量的变化。

电池充放电损耗费用对交易量的影响如附录C图C3所示。由图可见,交易量与电池充放电损耗费用呈反相关关系,且随着电池充放电损耗费用的上升,交易量的下滑趋势愈加明显。其原因在于,电池充放电损耗费用增加导致交易成本增加,挤压售电者的盈利空间,部分售电者因无利可图而不得不退出市场。当电池充放电损耗费用为0.4元/(kW·h)(对应图中横坐标1.33 p.u.)时,电力交易的市场出清价格在0.9元/(kW·h)以上,此时仅在电网峰时段存在少量买卖交易,经济活动趋冷。而实际上目前的电池充放电损耗费用在0.6元/(kW·h)以上,峰时段跨区交易的市场份额将进一步被挤占,交易市场愈加萧条,V2G行为的经济性优势不够明显。

事实上,交易成本中的另一影响因素交易服务费用,与电池充放电损耗费用并无本质区别,二者对

交易行为的影响可以完全等同。由此可知,合理控制市场交易的附加费用能够有效调控市场交易的活跃程度,进而实现对电动汽车群体的趋利引导。

2)峰、平时段相对电价对交易行为的影响。

由于电网电价受地区政策限制,电动汽车的购电成本由企业主导,二者均存在大幅波动的可能。为便于比较二者变动对交易行为的影响,固定谷时段电价以及交易服务费用不变,峰、平时段的电价相对波动(等效为峰、平时段的电价同时波动的情况),将变化的峰时段电价代入优化策略中可得到交易量的变化。

相对价格对交易量的影响如附录C图C4所示。由图可见,若峰时段电量的相对价格升高,平时段电价变为相对低价的形态,电动汽车交易量开始增加。其原因在于,当峰、平时段电量的相对价格提高时,限制跨区交易的过网费用等附加成本的影响逐步弱化,有利可图促使电动汽车群体间交易量增加,反之,当峰、平时段电量的相对价格降低时,跨区交易的规模受到限制,本地峰、平时段高价合约的生存空间受到挤压,交易电量将逐步由谷时段满充的电动汽车进行承担。

综上,电网电价会严重影响交易行为,通过制定合理的电价能够积极引导电动汽车的充放电行为,减轻电网负担,实现削峰填谷的目的。

4.5 从多方利益分析共享经济的概念和普遍获益性

本文利用的区块链和V2G技术,具有互补性和统一性,实现了电动汽车领域的共享经济。区块链技术实现了V2G交易模式的去中心化,从源头上解决了社会的信息不对称和第三方管理的信任问题,显著降低了交易成本,提高了交易的安全性和可靠性,为电量供给者和需求者之间的直接匹配提供了可能。

对于参与的各方而言:调动具有夜间充电条件的电动汽车投入储能商业活动中,并使其赚取利润;电量需求方能够以低于同一时刻电网电价的充电成本获得所需电量,保障自身利益;电网中机组运行压力得以缓解,实现了一定程度的削峰填谷作用,更好地减少弃风,找到了较为廉价的备用容量供应,且能收取一笔可观的过网费用;若售电商日夜间售电价格一定,电动汽车的购买电量不但不会减少,反而会由于逆变器的损耗而稍有增加,实质上售电商的利润也有所保障。利润主要来自于电网更好地消纳风电、缩减备用服务费用所节约的开支,通过区块链交易市场实现了利润的多方共享。

5 结论

本文立足于去数据共享、去中心化的区块链技

术,建立电动汽车群体内、电动汽车群体间以及电动汽车群体与电网的V2G交易新模式。本文所提交易模式在电网峰、谷、平时段电价的分布格局下,能够使电动汽车进行更为合理的充放电,有效地起到削峰填谷的作用,并实现了电动汽车领域的共享经济。通过本文的研究工作可以得到如下结论:

1)本文建立的V2G新模式,基于区块链技术可以实现包括车辆-车辆和车辆-电网的多种自发交易;

2)本文所建V2G价格交易模式,不仅能够使电动汽车和电网获得收益,还可以实现电动汽车负荷的削峰填谷,引导电动汽车在更合理的时段进行充放电,缓解了电网的压力;

3)电网和监管方通过适当改变交易的峰、谷电价以及跨区交易服务费用,可以对V2G交易进行控制和引导,改变交易电量以适应电网的需要;

4)该平台具备扩展性,不仅可以引导电动汽车的充放电行为,还可能在使用电动汽车对电网进行调峰调频、为新能源并网提供相应的储能服务等多种潜在的服务类型。

未来笔者将深入探索区块链计算效率相关问题,以满足高效计算的实际需求。

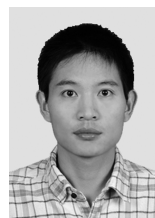
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 谢仕伟,胡志坚,王珏莹.考虑时-空耦合的城市电力-交通网络动态流量均衡[J].中国电机工程学报,2021,32(4):1-16.
XIE Shiwei, HU Zhijian, WANG Yuying. Dynamic flow equilibrium of urban power and transportation networks considering the coupling in time and space[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 32(4): 1-16.
- [2] 郭创新,刘洞宇,朱承治,等.电动汽车居民区充电负荷建模分析[J].电力自动化设备,2020,40(1):1-9.
GUO Chuangxin, LIU Dongyu, ZHU Chengzhi, et al. Modeling and analysis of electric vehicle charging load in residential area[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 1-9.
- [3] 严干贵,刘华南,韩凝晖,等.计及电动汽车时空分布状态的充电站选址定容优化方法[J/OL].中国电机工程学报. [2021-03-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20210120.1747.010.html>.
- [4] 苏粟,刘紫琦,王世丹,等.基于用户驾驶行为特性的电动汽车有序充电策略[J].电力自动化设备,2018,38(3):63-71.
SU Su, LIU Ziqi, WANG Shidan, et al. Ordered charging strategy of electric vehicles based on users' driving behavior[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 63-71.
- [5] 王守相,陈建凯,王洪坤,等.综合考虑电动汽车充电与储能及可中断负荷调度的配电网两阶段灵活性提升优化方法[J].电力自动化设备,2020,40(11):1-10.
WANG Shouxiang, CHEN Jiankai, WANG Hongkun, et al. Two-stage flexibility improvement optimization method of distribution network considering EV charging and scheduling of energy storage and interruptible loads[J]. Electric Power Automation

- Equipment, 2020, 40(11): 1-10.
- [6] 王毅, 麻秀, 万毅, 等. 基于分时充放电裕度的电动汽车有序充电引导策略[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4353-4361.
WANG Yi, MA Xiu, WAN Yi, et al. Sequential charge-discharge guidance strategy for electric vehicles based on time-sharing charging-discharging margin[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4353-4361.
- [7] 徐智威, 胡泽春, 宋永华, 等. 基于动态分时电价的电动汽车充电站有序充电策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3638-3646.
XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging strategy for PEV charging stations based on dynamic time-of-use tariffs[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3638-3646.
- [8] 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.
- [9] 耿晓冬. 老旧小区应合理安装充电桩[J]. 北京观察, 2016(6): 44.
- [10] 翁国庆, 黄飞腾, 张有兵, 等. 电动公交车电池集群参与海岛微网能量调度的V2G策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 31-37.
WENG Guoqing, HUANG Feiteng, ZHANG Youbing, et al. V2G strategy for energy dispatch of island microgrid with EBBG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 31-37.
- [11] 潘振宁, 张孝顺, 余涛, 等. 大规模电动汽车集群分层实时优化调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 96-104.
PAN Zhenning, ZHANG Xiaoshun, YU Tao, et al. Hierarchical real-time optimized dispatching for large-scale clusters of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 96-104.
- [12] 刘晓飞, 张千帆, 崔淑梅. 电动汽车V2G技术综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 121-127.
LIU Xiaofei, ZHANG Qianfan, CUI Shumei. Review of electric vehicle V2G technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 121-127.
- [13] 裴凤雀, 崔锦瑞, 董晨景, 等. 区块链在分布式电力交易中的研究领域及现状分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1752-1771.
PEI Fengque, CUI Jinrui, DONG Chenjing, et al. The research field and current state-of-art of blockchain in distributed power trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1752-1771.
- [14] 金志刚, 吴若茜, 李根, 等. 基于联盟区块链的电动汽车充电交易模型[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4362-4370.
JIN Zhigang, WU Ruqian, LI Gen, et al. Transaction model for electric vehicle charging based on consortium blockchain[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4362-4370.
- [15] 刘维扬, 王冰, 王敏, 等. 智能合约技术下电动汽车入网竞价机制研究[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4344-4352.
LIU Weiyang, WANG Bing, WANG Min, et al. Research on electric vehicles participating in bidding mechanism of power grid based on smart contract technology[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4344-4352.
- [16] 张富宝, 李国, 王滔滔. 基于区块链技术的电动汽车充电链[J]. 计算机技术与发展, 2020, 30(4): 161-166.
ZHANG Fubao, LI Guo, WANG Taotao. Electric vehicle charging chain based on blockchain technology[J]. Computer Technology and Development, 2020, 30(4): 161-166.
- [17] 王毅, 赵辉辉, 侯兴哲, 等. 基于合约订单的微电网分布式电能交易模型[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3900-3907.
WANG Yi, ZHAO Huihui, HOU Xingzhe, et al. Distributed electricity trading model in microgrid based on contract orders[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3900-3907.
- [18] 付晓琳, 王鸿, 王致杰. 基于区块链含电动汽车的微电网组合出力优化策略[J]. 电力建设, 2020, 41(11): 16-26.
FU Xiaolin, WANG Hong, WANG Zhijie. Combined output optimization based on blockchain for micro-grid with electric vehicles[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(11): 16-26.
- [19] 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、模型和方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 425-436.
WANG Haoran, CHEN Sijie, YAN Zheng, et al. Blockchain-enabled charging right trading among EV charging stations: mechanism, model, and method[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 425-436.
- [20] 王毅, 赵辉辉, 侯兴哲, 等. 基于链码和多阶段混合拍卖机制的微电网分布式电能交易模型[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1302-1309.
WANG Yi, ZHAO Huihui, HOU Xingzhe, et al. Distributed electricity transaction mode in microgrid based on chaincode and multi-stage hybrid auction mechanism[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1302-1309.
- [21] 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.
- [22] 焦连伟, 魏萍, 方军, 等. 一种阻塞管理分散优化算法的研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 5-9.
JIAO Lianwei, WEI Ping, FANG Jun, et al. A decentralized optimization for congestion management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(4): 5-9.
- [23] 谭振飞, 阮广春, 钟海旺, 等. 适应交易机构相对独立的双边交易安全预校核方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 106-113.
TAN Zhenfei, RUAN Guangchun, ZHONG Haiwang, et al. Security pre-check method of bilateral trading adapted to independence of power exchange[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 106-113.
- [24] 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.

作者简介:



康 慨

康 慨(1987—),男,湖北荆门人,高级工程师,硕士,从事智慧电网、新能源、综合能源方面的研究工作(E-mail:kkangkai@163.com);

施 念(1981—),男,湖北黄冈人,工程师,博士,从事电力系统规划、电力市场方面的研究工作(E-mail:shinsj@powerchina-hb.com);

汪 涛(1999—),男,浙江宁波人,硕士研究生,通信作者,研究方向为新能源发电(E-mail:taowang163hust@163.com)。

(编辑 王锦秀)

(下转第114页 continued on page 114)

Refined prediction of transient stability margin based on artificial intelligence

WU Chunming^{1,2}, REN Jihong²

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,
Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Department of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The artificial intelligence algorithm has been well applied in transient stability assessment. However, the power system is a time-varying system, so the training data cannot cover all the working conditions, and the model needs to be updated within a limited time. The number of stable samples in power system is much larger than the number of unstable samples, which leads to the lack of learning from unstable samples. In view of the above two points, the refined prediction method of transient stability margin based on artificial intelligence is proposed. This method integrates the improved XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) tree with the double XGBoost regression tree, so that the effects on the model caused by the difference number of two types of samples are balanced, and the margin prediction is realized. When the operating conditions change greatly, the incremental learning technology is combined to effectively update the model with fewer samples and shorter time. Experimental results on the two IEEE systems show that the proposed method can be applied in transient stability assessment.

Key words: XGBoost algorithm; transient stability assessment; incremental learning; electric power systems; cost sensitive

(上接第86页 continued from page 86)

New decentralized V2G mode of electric vehicles based on blockchain technology

KANG Kai¹, SHI Nian¹, WANG Yanpeng¹, ZHANG Yunlong¹, LIN Xiangning², WANG Tao²,

LI Zhengtian², PAN Shuaiqi³

(1. Power China Hubei Electric Engineering Co., Ltd., Wuhan 430074, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. School of Electrical and New Energy, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: From the perspective of sharing economy, a new decentralized V2G (Vehicle-to-Grid) mode based on blockchain technology is proposed. Taking advantage of the natural complementarity between blockchain technology and V2G technology, the electric vehicles connected to the network package the surplus electricity into futures goods with reasonable price, and spread the electricity sales information to the whole network through point-to-point technology. Meanwhile, the electric vehicles that need emergency charging buy the futures goods with the lowest price during the charging period and reach temporary contracts, the transactions will be formally reached after the security check of power grid, the power transaction information is stored in the form of smart contract, and the value is transferred automatically when it is due, which realizes the purpose of self-matching and direct bilateral transaction between the two parties in the electricity market of electric vehicles. On this basis, a feasible transaction theoretical model is built. The simulation and analysis based on 150 electric vehicles in two communities verify the economy and feasibility of the proposed transaction strategy.

Key words: blockchain; V2G; futures contract; sharing economy; network crossing cost

附录 A:

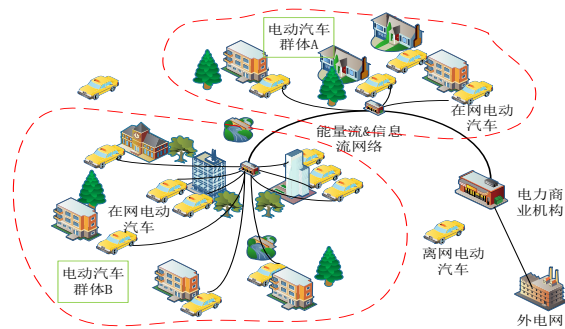


图 A1 电动汽车 V2G 应用场景

Fig.A1 Application scenario of electric vehicle V2G

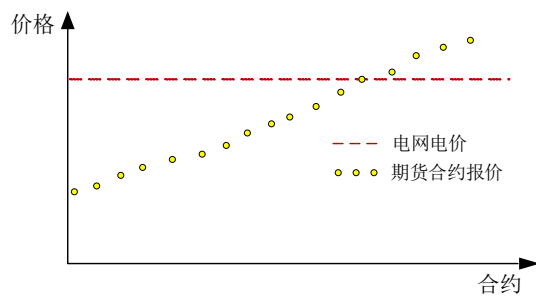


图 A2 供应池中某一时段报价曲线排序示意图

Fig.A2 Schematic diagram of quotation curve sequencing at a certain time in supply pool

附录 B:

图 B1 展示了早九晚五型购买者情况。个体 3 夜间没有充电，电池电量严重不足，急需在 17:00 离开前满充将近 4 h 的电量。个体 3 在 09:00 挂网，开始寻找合适的售电合约。由于 09:00—12:00 处于电网峰时段，电动汽车竞争又十分激烈，可见的期货商品的报价普遍高于平时段电网电价，而且此时“供应池”中下午的期货合约数较少，且均已签订，个体 3 选择等待。随着时间推移，个体 3 首先搜寻到“供应池”内 13:00—14:00 的期货合约，立即签订；继续滚动搜寻，依次签订了 14:00—15:00、16:00—17:00 的期货合约，但电量仍有缺口。直到 15:00 逼近，个体 3 仍然未能搜索到 15:00 的期货合约，最终选择购买电网电量填补电量缺口。17:00 顺利驶离。

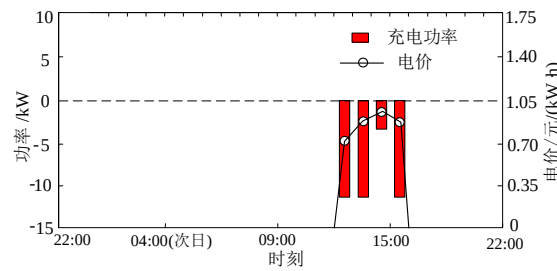


图 B1 典型个体 3 行为图

Fig.B1 Behavior diagram of typical individual 3

图 B2 展示了断续在网型购买者情况。个体 4 从远方而来，预计 16:00 前到达。个体 4 在中午搜索目的地的“供应池”，未发现到达时刻售价合理的期货商品。虽然此时在本地该商品的售价较为低廉，但是在计及过网费等成本后，期货商品在目的地的售价超过了同一时刻的电网电价，因此暂时没有合适的期货合约可供签订。个体 4 继续等待，滚动搜索，实时刷新。随着时间推移，个体 4 依次买到了 4 个不同价格的期货合约，成功节约了购电成本。

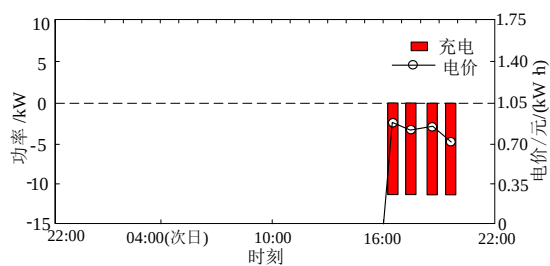


图 B2 典型个体 4 行为图

Fig.B2 Behavior diagram of typical individual 4

附录 C:

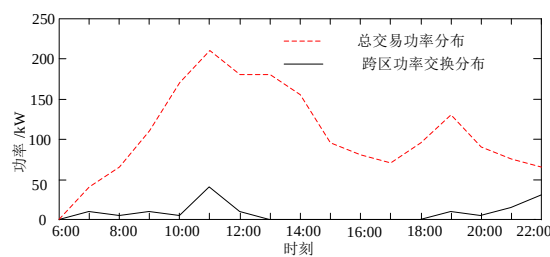


图 C1 电动汽车的交易分布

Fig.C1 Transaction distribution of electric vehicles

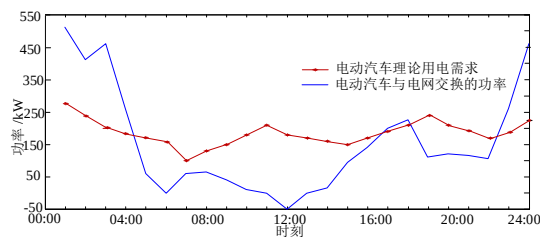


图 C2 电动汽车与电网交换功率图

Fig.C2 Power exchange diagram between electric vehicle and power grid

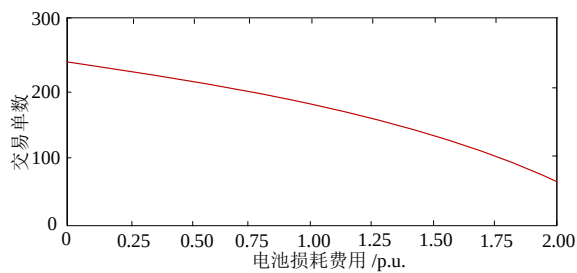


图 C3 电池充放电损耗费用对交易量的影响

Fig.C3 Effect of battery loss cost on transaction quantity

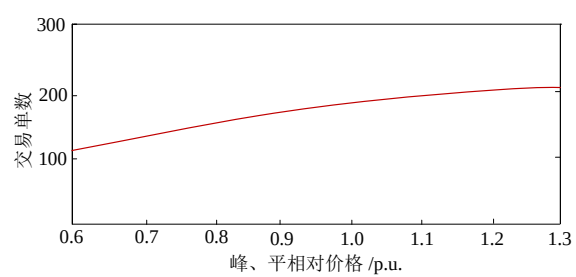


图 C4 相对价格对交易量的影响

Fig.C4 Effect of relative price on transaction quantity