

文章编号:1006-2467(2021)S2-0064-08

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.S2.010

基于区块链技术的电动汽车绿证交易研究

胡春阳¹, 吴鑫¹, 周峰²

(1. 国家电网有限公司华东分部, 上海 200120; 2. 南京恒智信息技术有限责任公司, 南京 210000)

摘要: 绿证作为新能源电力清洁属性的经济价值衡量货币, 可以为政府减轻可再生能源电力补贴负担. 电动汽车作为大规模可调度负荷, 具有承担购买绿证的义务. 绿证交易双方利用区块链平台去中心化的优势直接进行交易, 以新能源发电商收入最多、电动汽车聚合商成本最低为目标, 考虑绿证在市场中的供需情况对绿证价格和新能源电价的影响, 完善绿证交易及电动汽车充电调度策略. 对比电动汽车是否参与绿证交易时新能源发电商的发电情况和效益. 算例结果证明电动汽车参与绿证交易能够有效提升新能源机组出力消纳和新能源发电商效益.

关键词: 绿证; 区块链; 新能源; 电动汽车

中图分类号: TM 76 **文献标志码:** A

Green Certificate Transaction of Electric Vehicle Based on Blockchain Technology

HU Chunyang¹, WU Xin¹, ZHOU Feng²

(1. East Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China;

2. Nanjing Hengzhi Information Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: Green certificate, as a new energy power clean attribute of the economic value of measurement currency, can reduce the burden of renewable energy power subsidies for the government. As a large-scale schedulable load, electric vehicles (EVs) have the obligation to purchase green certificates. The two sides of green certificate transaction take advantage of the decentralization of blockchain platform to conduct transactions directly. Aimed at the highest revenue of new energy power producer and the lowest cost of EV aggregator, and considering the influence of supply-demand of green certificate on green certificate price and new energy price, the green certificate transaction and the charging scheduling strategy of EV were solved. The power generation and benefits of new energy power producers with and without green certificate transaction of EVs were compared. The results show that the participation of EVs in green certificate transaction can effectively increase the capacity of new energy generating units and improve the efficiency of new energy generators.

Key words: green certificate; blockchain; new energy; electric vehicle (EV)

区块链技术是一种全新的去中心化基础架构和分布式计算范式, 其利用加密链式区块结构验证和

存储数据, 利用分布式节点共识算法生成和更新数据, 并利用自动化脚本代码编程和操作数据^[1]. 区块

收稿日期: 2021-10-26

作者简介: 胡春阳(1974-), 男, 上海市人, 高级工程师, 从事电力系统自动化及通信技术研究.

电话(Tel.): 021-38732990; E-mail: hu_cy@ec.sgcc.com.cn.

链可以通过节点并行处理多个数据,有利于加快数据处理速度,增强系统数据处理和传输安全性。

区块链具有与电动汽车充电交易体系相似的网络拓扑形态,能够较好地满足电动汽车充电的智能性、同步性和安全性需求,在电动汽车充电交易领域得到广泛研究。陈泽西等^[2]在区块链技术的基础上,介绍一种以“多卖方-多买方”为竞争机制,以还原电力商品属性为目标的电动汽车充电交易模型,该模型利用区块链技术的特点,实行用户协商定价,能够开放用户权利。陈妍希等^[3]提出基于电动汽车联盟链的互信交易架构和调度策略,利用电动汽车的移动储能特性,实现供求自平衡。辛凯华^[4]以电网阻塞调整为基础,引入面向电动汽车充电响应问题的电网阻塞调整策略,介绍一种以功率灵敏度为基础的阻塞电价制定模型。朱书坤^[5]设计了基于区块链的信息管理模块,若用户需要查询了解近期的系统交易账单,则可以通过网络节点进行操作,实现消费标准一致性,并享受充电服务体验;同时,设计身份识别模块,并以区块链和相关的卷积神经网络为基础,完成车辆身份验证,实现车牌识别的高效性和身份认证的可靠性。王惠洲等^[6]应对电动汽车充电和风光出力的不确定性以及分散化电力交易风险,提出以联盟区块链技术为基础的电动汽车充电交易平台和考虑风光出力的电动汽车有序充电策略。

绿色证书(简称绿证)代表绿色电力清洁属性的货币价值,随着新能源规模逐渐扩大,绿证市场交易逐渐普及。绿证的引入可以为政府减少新能源电力补贴负担,有助于促进可再生能源电力消纳。电力系统内绿证交易已得到广泛研究。冯昌森等^[7]为了激励新能源发电,推送能源转型升级,并对传统化石能源机组的二氧化碳排放量进行一定限制,将传统化石能源企业与新能源绿色发电企业联合,全局优化配置绿证和二氧化碳的排放权资源,形成一种基于绿证和二氧化碳联合交易的市场模式。李雅超等^[8]分析了可再生能源发电商、常规能源发电商和售电公司等交易主体之间的电力和绿证供需关系,以各发电商的利益最大化为目标,建立考虑绿证的能源经济调度模型,求解消纳保障机制下发电商电力调度和证书交易策略。骆钊等^[9]综合考虑绿证交易机制和热网,提出一种基于可再生能源配额制的多园区综合能源系统优化调度模型,能够有效提高系统可再生能源消纳能力,减少系统碳排放。刘敦楠等^[10]通过充电负荷聚合商参与绿证交易市场,并分析相应的驱动力,成功建立了以充电负荷聚合商为研究对象的内外二级绿证交易模式。

区块链平台下的电动汽车充电交易和电力系统中绿证交易的相关研究较为深入,然而将电动汽车引入绿证交易市场的研究并不多见。本文为电动汽车分配绿证额度,发挥区块链平台下电动汽车购电的自主选择优势,利用绿证在市场中的供需关系和电动汽车对充电电力的需求,建立电动汽车绿证交易模型。以电动汽车经济成本最低为目标,优化调度电动汽车购电行为及绿证交易情况。算例分析结果表明:将电动汽车引入绿证交易市场有助于新能源消纳,提升可再生能源电力所占市场比例和经济效益。

1 区块链应用

1.1 区块链在电动汽车充电交易的应用

目前,电动汽车的大规模发展受到较多实际因素限制,如电动汽车充电设施数量、充电协议和充电价格的计量方式等。此外,电动汽车充放电的互动性不够灵活,且进行电动汽车充放电过程的不透明情况较明显^[11]。对此,德国莱茵集团与斯洛克合作,有效解决了部分使用区块链技术问题,利用智能合约和分布式簿记,改善透明度和公共收费桩收费的信任问题^[12]。同时,德国莱茵集团以电动汽车多样化为目标,针对充电模式的统一性交易,利用巨链数据库,并综合考虑区块链技术和大数据技术,将具备法律约束力的证书和合同均存储在区块链中;建立分布式大容量数据库,对电动汽车公用充电网络进行管理^[13]。

1.2 区块链在绿证交易中的应用

利用区块链技术可以生成绿证。根据交易模式,开展市场交易的基础为绿证的形成和封装。在信息保密和分布式交易方面,区块链技术具有特殊优势。为了实现市场交易的有效性和公平性,利用区块链技术对绿证进行标识,包括系统的内外交易^[14],从而充分实现绿证市场的协调能力。

绿证交易区块链的结构为精准记录可再生能源的上网耗电量,并将其传输到智能电表中;在链上的内置规则,即当电源侧绿证产量高于电网侧需求时,电源侧将多余绿证放到绿证交易市场出售,获取更多收益;否则,电网侧需要从绿证交易市场购买绿证或接受惩罚,从而完成自动核对并发放绿证^[15]。绿证交易市场中目标是具有绿证配额的相关企业,其可以出售绿证,获得经济效益和绿色电力补贴。一些以化石能源为主的电力生产商可以在市场上购买得到相应的配额指标,实现对绿色电力企业的补贴^[16]。绿证的交易环节均在链上开展,有利于保证

交易的可靠性,减轻监管负担.

2 电动汽车参与绿证交易

在可再生能源配额制度逐步实施的背景下,绿卡交易市场逐步完善和发展.代表清洁能源充电负荷的电动汽车也需要加入绿证交易市场,以实行可再生能源定额制度^[17].图 1 为电动汽车参与绿证交易框图.发电方将所发电力出售给电力交易市场,用户和电动汽车聚合商根据用电需求向电力交易市场购买电量.风电商和光伏发电商根据实际发电量向绿证交易市场售出绿证,常规能源发电商和电动汽车聚合商需要承担绿证配额任务,以减少经济成本为导向购买绿证.

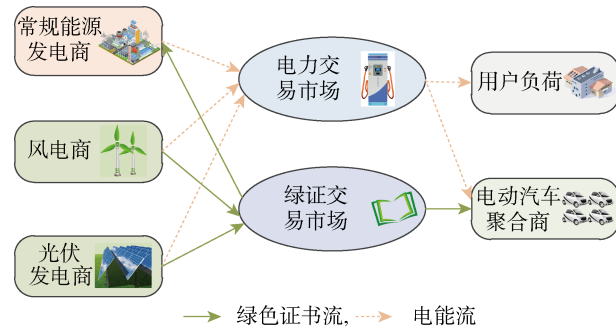


图 1 电动汽车参与绿证交易框图

Fig. 1 Diagram of electric vehicle participating in green certificate transaction

3 区块链平台下电动汽车绿证交易

图 2 为绿证交易市场的交易周期.区块链平台下电动汽车绿证交易流程如下:

步骤 1 政府和监管当局为进入交易市场的生产者和消费者设立绿证和二氧化碳排放配额,规定每个市场实体在区块链网络登记帐户;并根据市场和投标机制,将相应的独有公开密码匙和私人密码匙交还用户.监管当局制定相关的智能合约架构.

步骤 2 若清洁能源发电公司已通过资质审查,其在上网绿色电能计量后,即可以得到对应数量的绿证;新能源发电方和电动汽车用户根据自身需求向网络中密封申报绿证的报价信息,包括交易量和价格.

步骤 3 为了保证合同的有效性,通过访问地址,参与者可以调用智能合约,使交易对象、交易时间和合同自动执行等成为合同条件,并用自己的私钥签订合同.基于连续双向拍卖机制,合同匹配每个生产者和消费者的报价.

步骤 4 已执行的合同将通过 P2P 交易模式在

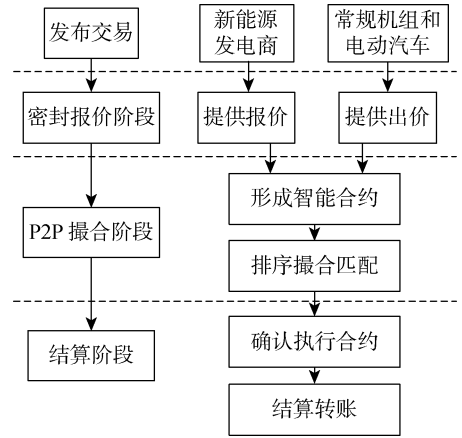


图 2 绿证交易市场的交易周期

Fig. 2 Trading cycle of green certificate market

地区能源网络上广播,最新的合同将被捆绑成若干块,并在交易所市场网络上传播.

步骤 5 通过一致性机制验证的契约在区块链网络中进行传播和存储,事务节点通过客户端接口调用网络已接受的契约,节点首先将契约保存在内存中.当事务启动时,请求被发送,状态机被激活以对清算契约执行匹配的清算操作.根据每笔交易的具体细节转移结算合同,在规定时间内由部分节点核实后达成协议,智能合约执行完毕.

步骤 6 在设定上限周期结束前,清算双方在联合交易市场发出绿证数量.记录绿证交易数量,并作为下一个周期设定配额的基础.

4 电动汽车绿证交易模型

4.1 绿证配额

新能源发电商根据实际发电量获得绿证数量,风力和光伏发电商每发 1 MW · h 绿色电力获得一个绿证^[18],因此风电和光伏机组发电商的绿证配额量分别为^[19]

$$n_{w,t} = \epsilon_w P_{w,t} \quad (1)$$

$$n_{s,t} = \epsilon_s P_{s,t} \quad (2)$$

式中: ϵ_w 和 ϵ_s 分别为绿色电力转换绿证配额系数; $P_{w,t}$ 和 $P_{s,t}$ 分别为风电和光伏机组在 t 时段的发电量.

常规机组发电商在发电过程中产生大量二氧化碳,因此需要承担绿证配额任务,以促进电力系统发电组成向更清洁的方向发展.其绿证配额量为^[20]

$$n_{g,t} = \epsilon_g P_{g,t} \quad (3)$$

式中: ϵ_g 为常规机组绿证配额系数; $P_{g,t}$ 为常规机组在 t 时段的发电量.

随着电动汽车规模的逐渐扩大,电动汽车在区

区块链平台中对电力的选择性可以有效促进新能源电力消纳。为电动汽车分配绿证额度是提升新能源电力市场占比的有利措施,电动汽车绿证配额量为

$$n_{v,t} = \epsilon_v P_{v,t} \quad (4)$$

式中: ϵ_v 为电动汽车绿证配额系数; $P_{v,t}$ 为电动汽车在 t 时段的充电量。

4.2 目标函数

在电动汽车绿证交易中,电动汽车聚合商和新能源发电商分别占据区块链的一个节点,双方均

以自身经济成本最低为目标进行调度。新能源成本($C_{x,t}$)由发电成本、售电收益和绿证收益组成,且

$$\min C_{x,t} = C_{w,t}P_{w,t} + C_{s,t}P_{s,t} - \lambda_{g,t}(n_{w,t} + n_{s,t}) - k_{w,t}P_{w,t} - k_{s,t}P_{s,t} \quad (5)$$

式中: $C_{w,t}$ 和 $C_{s,t}$ 分别为风电和光伏机组的单位发电成本; $\lambda_{g,t}$ 为 t 时段的绿证价格; $k_{w,t}$ 和 $k_{s,t}$ 分别为风电和光电的单价。

电动汽车成本($C_{v,t}$)主要由购买绿证的成本、绿证配额未完成部分缴纳的罚金和充电成本组成,且

$$\min \sum_{v=1}^N C_{v,t} = \lambda_{g,t}(g_{v,t}^w + g_{v,t}^s) + \lambda_{g,t}^f(n_{v,t}^w - g_{v,t}^w - g_{v,t}^s) + k_{w,t}P_{w,t}^v + k_{s,t}P_{s,t}^v + k_{g,t}P_{g,t}^v \quad (6)$$

式中: v 为电动汽车数量; $g_{v,t}^w$ 和 $g_{v,t}^s$ 分别为电动汽车向风电和光伏机组购买的绿证数量; $\lambda_{g,t}^f$ 为 t 时段的绿证罚金价格; $P_{w,t}^v$ 、 $P_{s,t}^v$ 和 $P_{g,t}^v$ 分别为电动汽车向风电、光伏和常规机组的购电量。

新能源电价受发电量的影响而实时波动,计算公式如下:

$$k_{w,t} = k_w - \alpha_1(P_{w,t} - P_w) \quad (7)$$

$$k_{s,t} = k_s - \beta_1(P_{s,t} - P_s) \quad (8)$$

式中: k_w 和 k_s 分别为风电和光伏机组的基准价格; α_1 和 β_1 分别为风电和光伏机组随发电量变化的斜率; P_w 和 P_s 分别为风电和光伏机组的发电基准值。

根据绿证的供需不平衡度,按比例调整绿证的价格:

$$\lambda_{g,t} =$$

$$\lambda_g - D(n_{w,t} + n_{s,t} - g_{v,t}^w - g_{v,t}^s - g_{g,t}^w - g_{g,t}^s) \quad (9)$$

式中: λ_g 为绿证价格基准值; D 为绿证价格随需求关系变化的斜率; $g_{g,t}^w$ 和 $g_{g,t}^s$ 分别为常规能源机组向风电和光伏机组购买的绿证数量。

4.3 约束条件

新能源机组约束条件为

(1) 出力约束^[21]

$$0 \leq P_{w,t} \leq P_w^{\max} \quad (10)$$

$$0 \leq P_{s,t} \leq P_s^{\max} \quad (11)$$

$$\sum_{v=1}^N P_{vw,t} \leq P_{w,t} \quad (12)$$

$$\sum_{v=1}^N P_{vs,t} \leq P_{s,t} \quad (13)$$

式中: P_w^{\max} 和 P_s^{\max} 分别为风电和光伏机组的最大出力。

(2) 弃风、弃光约束^[22]

$$\sum_{t=1}^T P_{w,t} \geq (1-h) \sum_{t=1}^T P_w^{\max} \quad (14)$$

$$\sum_{t=1}^T P_{s,t} \geq (1-w) \sum_{t=1}^T P_s^{\max} \quad (15)$$

式中: h 和 w 分别为最大弃风率和最大弃光率。

常规能源机组约束条件为

(1) 出力约束

$$P_g^{\min} \leq P_{g,t} \leq P_g^{\max} \quad (16)$$

式中: P_g^{\min} 和 P_g^{\max} 分别为常规机组的最小和最大出力。

(2) 爬坡、滑坡约束

$$-J_g^D \Delta t \leq P_{g,t} - P_{g,(t-1)} \leq J_g^U \Delta t \quad (17)$$

式中: J_g^D 和 J_g^U 分别为常规机组在单位时间的滑坡功率上限和爬坡功率上限^[23]。

电池电量约束条件为^[24-25]

$$S_v^{\min} \leq S_{v,t} \leq S_v^{\max} \quad (18)$$

$$S_{v,t} = S_{v,(t-1)} + \eta_v \frac{(P_{w,t}^v + P_{s,t}^v + P_{g,t}^v)}{E_v} \quad (19)$$

$$S_{v,t_{\text{ent},v}} = S_{\text{ent},v} \quad (20)$$

$$S_{\text{lea},v} \leq S_{v,t_{\text{lea},v}} \leq 1 \quad (21)$$

式中: $S_{v,t}$ 为电动汽车在 t 时刻的电池荷电状态; S_v^{\min} 和 S_v^{\max} 分别为电动汽车电池荷电状态的最小值和最大值; η_v 和 E_v 分别为电动汽车的充电效率和电池容量; $t_{\text{lea},v}$ 和 $t_{\text{ent},v}$ 分别为第 v 辆电动汽车的离网和入网时刻; $S_{\text{lea},v}$ 为第 v 辆电动汽车离网时期望达到的电池荷电状态; $S_{\text{ent},v}$ 为第 v 辆电动汽车入网时的电池荷电状态。

功率平衡约束条件为

$$P_{w,t} + P_{s,t} + P_{g,t} = P_t^s + \sum_{v=1}^N (P_{w,t}^v + P_{s,t}^v + P_{g,t}^v) \quad (22)$$

式中: P_t^s 为 t 时段用户负荷。

绿证约束条件为

$$g_{v,t}^w + g_{g,t}^w \leq n_{w,t} \quad (23)$$

$$g_{v,t}^s + g_{g,t}^s \leq n_{s,t} \quad (24)$$

5 算例分析

5.1 参数设置

算例系统包括 3 台常规能源机组、1 台风力发电机组、1 台光伏发电机组和 400 辆受调控的电动汽车. 将一天平均分为 24 个时段, 同一时段内各主体运行状态保持不变. 各参数设置如下.

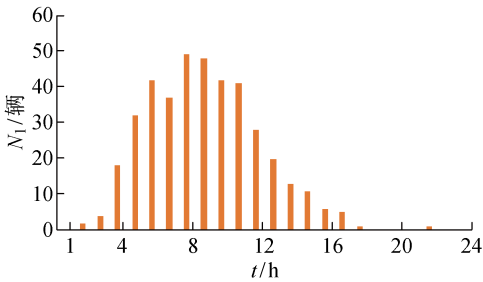
(1) 发电机组包括风电和光伏机组, 其出力函数分别为^[26-27]

$$P_{w,t} = \begin{cases} 0, & v_t < v_{in}, v_t > v_{out} \\ P_w^r \frac{v_t - v_{in}}{v_r - v_{in}}, & v_{in} \leq v_t < v_r \\ P_w^r, & v_r \leq v_t \leq v_{out} \end{cases} \quad (25)$$

$$f(\theta) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha) + \Gamma(\beta)} \theta^{\alpha-1} (1-\theta)^{\beta-1}, & 0 \leq \theta \leq 1, \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (26)$$

$$P(\theta) = \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} f(\theta) d\theta$$

式中: v_t 为 t 时段实际风速; v_{in} 和 v_{out} 分别为风电机组的切入和切出风速, 当 $v_t < v_{in}$ 或 $v_t > v_{out}$ 时, 风电机组无输出功率; v_r 和 P_w^r 分别为风电机组的额定风速和额定功率; $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数; α 和 β 分别为光伏机组所在地区辐照度的平均值和标准偏差值; θ 为日照幅度; θ_{max} 和 θ_{min} 分别为所在地区日照幅度的



最大值和最小值.

(2) 电动汽车出行情况. 电动汽车出行时间(离网时刻)和结束出行时间(入网时刻)的概率密度函数如下^[28]:

$$f_{lea}(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{lea}} \exp\left[-\frac{(x-\mu_{lea})^2}{2\sigma_{lea}^2}\right], & 0 < x \leq (\mu_{lea} + 12) \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{lea}} \exp\left[-\frac{(x-24-\mu_{lea})^2}{2\sigma_{lea}^2}\right], & (\mu_{lea} + 12) < x \leq 24 \end{cases} \quad (27)$$

$$f_{ent}(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ent}} \exp\left[-\frac{(x+24-\mu_{ent})^2}{2\sigma_{ent}^2}\right], & 0 < x \leq (\mu_{ent} - 12) \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ent}} \exp\left[-\frac{(x-\mu_{ent})^2}{2\sigma_{ent}^2}\right], & (\mu_{ent} - 12) < x \leq 24 \end{cases} \quad (28)$$

式中: $\mu_{lea} = 8.92$; $\sigma_{lea} = 3.24$; $\mu_{ent} = 17.47$; $\sigma_{ent} = 3.41$.

根据式(27)和式(28), 抽样得出 400 辆电动汽车的离网时刻和入网时刻, 其分布如图 3 所示. 其中, N_1 和 N_2 分别为电动汽车的出行数量和结束出行数量.

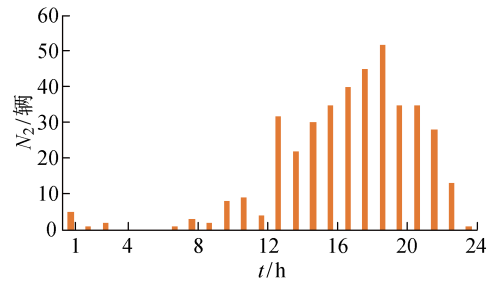


图 3 各时刻电动汽车离网和入网数量分布

Fig. 3 Off-grid and on-grid number of electric vehicles at each time

3 台常规能源机组燃气轮机的最大发电出力分别为 35、35、15 MW, 最小发电出力分别为 10、10、2 MW, 爬坡率和爬坡率均取 10 MW/h. 绿证基础价格为 200 元/个, 风电和光伏的基础电价分别为 0.39、0.42 元/(kW·h); 风电和光伏机组的最大弃风率和最大弃光率均取 20%; 400 辆电动汽车的 $S_{ent,v}$ 均设为 0.3^[29], $S_{lea,v}$ 取[0.85, 1]内均匀分布的随机数, 最大充电功率取 3.2 kW, $\eta_v = 90\%$.

5.2 模型求解

模型优化目标为双目标最小值, 因此利用 NS-GAII 进行求解, 能够防止求解过程中父代优秀个体

丢失, 并且计算复杂度低、收敛效率高, 最优解集具有良好的空间分布.

5.3 仿真结果与分析

首先, 探究区块链平台下电动汽车加入绿证交易对新能源收益的影响. 设置以下两种情景:

情景 1 电动汽车仅向发电机组购电, 不参与绿证交易.

情景 2 电动汽车既参与电量交易, 又参与绿证交易.

利用 NSGAII 进行求解, 得到各主体的调度结果. 表 1 为两种情景下新能源机组的调度结果. 电动

汽车参与绿证交易,促使新能源机组出力增多,以获得更多的绿证,因此新能源机组发电成本增加了 35 130 元。电动汽车向新能源机组购买绿证,使得新能源机组的绿证收益增加了 65 790 元,总收益增加了 7 239 元。

图 4 为两种情景下的新能源机组出力情况。可知,电动汽车参与绿证交易能够增加光伏和风电机组出力,有效提升新能源电力在市場中的占比。

图 5 为两种情景下电动汽车充电情况。可知,当电动汽车不参与绿证交易时,24 h 内充电电量的峰谷差小于 400 kW·h。当电动汽车参与绿证交易时,绿证供需量会影响其价格,为减少成本,将调整电动汽车充电情况。电动汽车购买绿证数量改变了

市场对绿证的需求情况,新能源机组通过调整出力改变绿证供应情况,供求关系的变化改变绿证价格,从而优化电动汽车成本和新能源机组收益。

表 1 两种情景的调度结果对比

Tab. 1 Comparison of scheduling results in two scenarios

元

| 情景 | 新能源 机组收益 | 新能源机组 运行成本 | 新能源机组 绿证收益 |
|----|-------------|---------------|---------------|
| 1 | 34 232 | 224 840 | 177 020 |
| 2 | 41 471 | 259 970 | 242 810 |

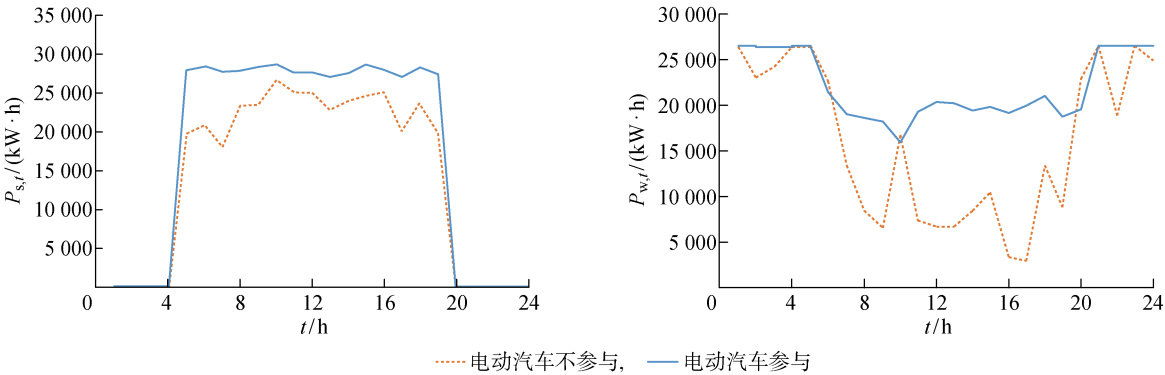


图 4 光伏和风电机组出力

Fig. 4 Output of photovoltaic unit and wind turbine

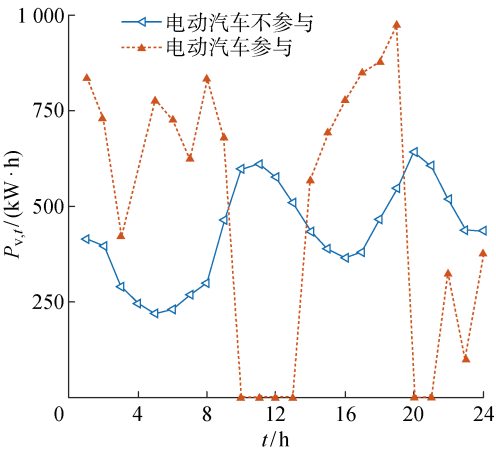


图 5 电动汽车充电情况

Fig. 5 Charging of electric vehicle

6 结语

在区块链平台中,电动汽车聚合商和新能源发电商各占据一个节点,以自身成本最低(效益最高)为目标调整调度方案,基于区块链安全性高和去中

心化等优点,实现信息透明和公平交易,为用户自主性奠定基础。本文为电动汽车引入绿证交易,使电动汽车在承担绿证配额任务的同时,通过其对绿证的购买需求,调整市场中绿证的价格,优化绿证交易市场,从而促进新能源机组出力,提高新能源电力的市场占比,提升新能源发电商效益并降低电动汽车成本。

参考文献:

[1] 袁勇,王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 42(4): 481-494.
YUAN Yong, WANG Feiyue. Blockchain: The state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4): 481-494.

[2] 陈泽西,孙玉树,张妍,等. 考虑风光互补的储能优化配置研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(Sup. 1): 145-153.
CHEN Zexi, SUN Yushu, ZHANG Yan, et al. Research on energy storage optimal allocation considering complementarity of wind power and PV [J].

- Transactions of China Electrotechnical Society**, 2021, 36(Sup. 1): 145-153.
- [3] 陈妍希, 赵奇, 龚育成, 等. 基于区块链技术的电动汽车充电交易探讨[J]. **电力工程技术**, 2020, 39(6): 2-7.
- CHEN Yanxi, ZHAO Qi, GONG Yucheng, *et al.* EV charging transaction based on blockchain technology [J]. **Electric Power Engineering Technology**, 2020, 39(6): 2-7.
- [4] 辛凯华. 基于智能合约的电动汽车充电选择决策方法[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2020.
- XIN Kaihua. Optimal dispatching of electric vehicles based on smart contract[D]. Xiangtan, China: Xiangtan University, 2020.
- [5] 朱书坤. 基于区块链和卷积神经网络的电动汽车能源交易方案设计与实现[D]. 武汉: 华中师范大学, 2020.
- ZHU Shukun. Design and implementation of electric vehicle energy trading scheme based on blockchain and convolutional neural network[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2020.
- [6] 王惠洲, 于艾清. 基于联盟区块链交易平台的电动汽车有序充电相对鲁棒优化[J]. **中国电力**, 2019, 52(8): 126-134.
- WANG Huizhou, YU Aiqing. Relative robust optimization of electric vehicle's sequential charging based on the alliance block chain trading platform[J]. **China Power**, 2019, 52(8): 126-134.
- [7] 冯昌森, 谢方锐, 文福拴, 等. 基于智能合约的绿证和碳联合交易市场的设计与实现[J]. **电力系统自动化**, 2021, 45(23): 1-11.
- FENG Changsen, XIE Fangrui, WEN Fushuan, *et al.* Design and implementation of joint trading market for green power certificate and carbon based on smart contract[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2021, 45(23): 1-11.
- [8] 李雅超, 撤晨宇, 肖艳炜, 等. 基于可再生能源经济调度时序模拟的绿证市场交易研究[J]. **智慧电力**, 2021, 49(4): 58-65.
- LI Yachao, HAN Chenyu, XIAO Yanwei, *et al.* Tradable green certificate market transaction based on economic scheduling timing simulation of renewable energy[J]. **Smart Power**, 2021, 49(4): 58-65.
- [9] 骆钊, 卢涛, 马瑞, 等. 可再生能源配额制下多园区综合能源系统优化调度[J]. **电力自动化设备**, 2021, 41(4): 8-14.
- LUO Zhao, LU Tao, MA Rui, *et al.* Optimal scheduling of multi-park integrated energy system under renewable portfolio standard[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2021, 41(4): 8-14.
- [10] 刘敦楠, 刘明光, 王文, 等. 充电负荷聚合商参与绿证交易的运营模式与关键技术[J]. **电力系统自动化**, 2020, 44(10): 1-9.
- LIU Dunnan, LIU Mingguang, WANG Wen, *et al.* Operation mode and key technology of charging load aggregator participating in green certificate trading [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2020, 44(10): 1-9.
- [11] 马伟, 郭连奎, 贺楠, 等. 基于区块链的大用户直购交易模式研究[J]. **电测与仪表**, 2021. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210517.0929.002.html>.
- MA Wei, GUO Liankui, HE Nan, *et al.* Blockchain-based direct purchase transaction mode for large users [J]. **Electrical Measurement & Instrumentation**, 2021. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210517.0929.002.html>.
- [12] 逯遥, 毛知新, 邱志斌. 区块链技术在能源物联网领域的发展与应用综述[J]. **广东电力**, 2021, 34(7): 1-12.
- LU Yao, MAO Zhixin, QIU Zhibin. Review of development and applications of blockchain technology in the field of energy Internet of Things[J]. **Guangdong Electric Power**, 2021, 34(7): 1-12.
- [13] 穆程刚, 丁涛, 曲明, 等. 基于区块链的表后微网系统及其点对点能量块交易模型设计[J]. **中国电机工程学报**, 2021, 41(20): 6927-6941.
- MU Chenggang, DING Tao, QU Ming, *et al.* Blockchain-based post-table microgrid system and its point-to-point energy block trading model design[J]. **Proceedings of the Electrical Engineering**, 2021, 41(20): 6927-6941.
- [14] 陈朗, 徐栖桐, 于春燕, 等. 区块链技术与去中心化电商平台的融合发展路径[J]. **中国市场**, 2021(13): 189-191.
- CHEN Lang, XU Xitong, YU Chunyan, *et al.* The integrated development path of blockchain technology and decentralized e-commerce platform [J]. **China Market**, 2021(13): 189-191.
- [15] 刘培德. 基于绿色电力证书的负荷优化调度[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- LIU Peide. Optimal load dispatching based on tradable green certificate[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [16] 张璐璐. 基于可再生能源配额制的风火联合竞价策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- ZHANG Lulu. Research on wind & thermal power joint bidding strategy based on renewable portfolio

- standard[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [17] 戴尚文, 张利, 刘宁宁, 等. 考虑可再生能源消纳责任的售电公司购电决策分析[J]. **中国电力**, 2021, 54(9): 156-164.
- DAI Shangwen, ZHANG Li, LIU Ningning, *et al.* Energy purchasing strategy of electricity retailer considering the responsibility of renewable energy consumption[J]. **Electric Power**, 2021, 54(9): 156-164.
- [18] 何倩. 可再生能源配额制下售电公司购电优化决策[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- HE Qian. Power purchase optimization decision of electricity sales companies under renewable portfolio standard[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [19] 黄龙. 考虑可再生能源配额制的电力市场研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- HUANG Long. Research on electricity market considering renewable portfolio standards[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [20] 魏震波, 隋东旭, 王瀚琳, 等. 含双边储备市场及绿证交易的现货市场分析[J]. **电力系统保护与控制**, 2020, 48(8): 52-60.
- WEI Zhenbo, SUI Dongxu, WANG Hanlin, *et al.* Spot market analysis including bilateral reserve market and green certificate trading[J]. **Power System Protection and Control**, 2020, 48(8): 52-60.
- [21] 蒋铁澄. 平衡机制和配额制下发售电主体的策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- JIANG Yicheng. Research on power generator and retailer's strategies under balancing mechanism and renewable portfolio standard[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [22] 高逸. 考虑可再生能源配额制的售电商购售电策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- GAO Yi. Power procurement and sale strategies for electricity retailers under renewable portfolio standards[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [23] 曲尧. 售电侧放开条件下电动汽车优化充电策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- QU Yao. A research on optimized charging strategy of electric vehicles under the condition of electricity market[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [24] 羌嘉曦, 敖国强, 何建辉, 等. 电动汽车动力电池特性仿真系统[J]. **上海交通大学学报**, 2009, 43(8): 1196-1200.
- QIANG Jiayi, AO Guoqiang, HE Jianhui, *et al.* Research on the battery simulation system of electric vehicles[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2009, 43(8): 1196-1200.
- [25] 梁吉, 左艺, 张玉琢, 等. 基于可再生能源配额制的风电并网节能经济调度[J]. **电网技术**, 2019, 43(7): 2528-2534.
- LIANG Ji, ZUO Yi, ZHANG Yuzhuo, *et al.* Energy-saving and economic dispatch of power system containing wind power integration under renewable portfolio standard [J]. **Power System Technology**, 2019, 43(7): 2528-2534.
- [26] 张丽丽. 促进新能源消纳的大用户直购电集中交易模式及算法[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- ZHANG Lili. The centralized trading strategy and algorithm of large consumers direct-purchasing for the promotion of renewable energy consumption proportion[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [27] 冯奕, 刘秋华, 刘颖, 等. 中国售电侧可再生能源配额制设计探索[J]. **电力系统自动化**, 2017, 41(24): 137-141.
- FENG Yi, LIU Qiuhua, LIU Ying, *et al.* Design and exploration of renewable portfolio standard in power demand side in China[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2017, 41(24): 137-141.
- [28] 徐基光. 基于绿证交易的含风电系统低碳经济调度[J]. **中国电力**, 2016, 49(7): 145-150.
- XU Jiguang. Low-carbon economic dispatching for power grid integrated with wind power system based on the green certificate trading mechanism[J]. **Electric Power**, 2016, 49(7): 145-150.
- [29] 陈玉珊, 秦琳琳, 吴刚, 等. 基于渐消记忆递推最小二乘法的电动汽车电池荷电状态在线估计[J]. **上海交通大学学报**, 2020, 54(12): 1340-1346.
- CHEN Yushan, QIN Linlin, WU Gang, *et al.* Online state of charge estimation for battery in electric vehicles based on forgetting factor recursive least squares[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2020, 54(12): 1340-1346.

(本文编辑:孙伟)