

基于智能合约的“光伏—充电站” 交易互动场景研究

谭玉东¹, 李 杨¹, 邓有月², 李 勇², 谢欣涛¹, 王雅慧²

(1. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 能源互联网供需运营湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004;
2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要:随着越来越多波动性强的分布式电源接入电网, 大规模电动汽车无序充电将对配电网安全稳定运行产生负面影响。在此背景下, 首先阐述一种面向“光伏—充电站”交易场景的智能合约的概念, 并分析其技术路线; 然后以光伏用户收益最大和充电站成本最小为目标, 构建双方基于智能合约直接进行电能交易的互动模型; 最后对提出的互动模型进行验证, 仿真结果表明: 光伏用户与充电站进行直接交易时, 双方经济效益均得到提高, 充电站通过合理地制定充电策略有助于提升光伏的就地消纳率, 减小与电网交互功率的波动, 有利于电网安全稳定运行。

关 键 词:智能合约; 互动场景; 交易协议; 充电策略

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.03.001 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2021)03-0003-08

Research on scenes of “PV-charging station” transaction based on smart contract

TAN Yudong¹, LI Yang¹, DENG Youyue², LI Yong², XIE Xintao¹, WANG Yahui²

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Economic & Technical Research Institute, Hunan Key Laboratory of Energy Internet Supply-demand and Operation, Changsha 410004, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The access of the distributed generation with strong volatility and the disordered charging of electric vehicles would threaten the stability operation of distribution network. Under the background, the concept of smart contract for the "photovoltaic household-charging station" transaction scenario and its technical route are analyzed firstly. Then, with the goals of maximizing the revenue of the photovoltaic user and minimizing the cost of the charging station, the interactive model is constructed on the basis of the smart contract. Finally, the simulation results show that when the photovoltaic user and the charging station trade electrical energy, their economic benefits are improved. Although the revenue of the power company has reduced, the reasonable charging strategies by the charging station will help increase the on-site consumption rate of photovoltaics, reduce the fluctuation of the power interaction with the grid and facilitate the safety of the grid.

Key words: smart contract; interactive scene; transaction agreement; charging strategy

目前中国能源消费仍以化石能源为主,造成能源危机和环境污染问题日益突出^[1]。普及使用电动汽车(electric vehicle, EV)在减少空气污染物和温室气体排放方面有着重要的意义,因此电动汽车保有量将在未来几年大幅增加^[2]。大量电动汽车的接入对电网来说,既是机遇也是挑战^[3],一方面,如果充电过程不受控制,在实施分时电价政策时,为了降低成本,电动汽车响应会将负荷需求转移到电价较低的时段,引起新的负荷峰谷差问题^[4];另一方面,由于电动汽车充电负荷的灵活性,可用于辅助服务,改善电网负荷曲线,使电网受益^[5]。

相关研究学者注意到结合可再生能源发电特性,引导电动汽车有序充放电能够提高可再生能源的利用率。文献[6]根据可再生能源出力和负荷的实时数据,求出当前微电网中的不平衡功率,并以此发布对应的电价信息,充分调动电动汽车参与微电网的调度,实现微电网中可再生能源和电动汽车的协调控制;文献[7]建立了多时间尺度的电动汽车—风电协同调度数学模型,并以华北电网和西北电网的规划和实测数据为基础,分析了调度电动汽车充电以平滑电网等效负荷波动、消纳夜间过剩风电的可行性;文献[8]提出一种基于风电功率预测的电动汽车双阶段调价策略,通过预测风电和调节电动汽车价格来提高电网对风电的消纳能力。

在传统电网中,用户只能作为被动的消费者消耗电能。在能量交易互动方面,电力用户往往没有接收到电网实时的运行信息以及价格信号,造成与电网的互动缺少,电网的供电压力过大,电网的稳定运行受到威胁^[9]。在需求响应方面,传统上的信息传递主要依靠电话、短信、邮件等通知方式,但是在这种互动模式中,信息收集不全面,指令不能及时下发,无法实时地对能量进行监测与管理^[10]。随着可再生能源、储能技术和智能计量设备的发展以及能源政策的鼓励,用户能够通过安装光伏发电系统、储能电池或者其他方式实现本地发电和储能,提高能量管理的自主意识^[11]。

智能电网(smart grid, SG)是当今电力行业的研究热点之一。智能电网与传统电网的一个重要不同点就是智能电网尤其强调与用户的互动^[12],一方面电网公司可以及时收集、统计与分析用户的需求,

整合用户信息,增强电力系统安全稳定性;另一方面用户可以及时了解电网的实时动态,合理地安排用电计划,甚至可以向电网售电,获得额外收益^[12]。智能电网涵盖多个不同的利益主体^[13],有时是合作关系,例如风光互补发电、冷热电联产等,协调多种能源的出力,考虑不同能源之间的互补性,实现多方共同互利共赢;有时是竞争对手,例如电能生产者与大电网存在竞争,当生产者将多余电能向电力市场出售时,电网的垄断地位受到威胁,此时它们需要加强信息互动,减少能量的过度生产;它们可能是依存关系,比如生产者与消费者之间签订相关的协议,通过双边合同市场,进行直购电交易,减少对大电网的依赖,实现自主能量的互动^[14]。

智能电网下,光伏用户能够将盈余电能向电网或者其他电力用户出售,从而获得额外收入。但分布式光伏电源的大规模并网会导致网架结构相对薄弱的配电网出现电压越限、网损升高和光伏发电“弃光”等问题。在这种情况下,对分布式光伏电源采用就地或就近消纳的方式更加合适^[15]。

针对上述问题,该文考虑光伏用户在光伏盈余时向附近的充电站供电。基于智能合约的概念,构建光伏用户与充电站的协议交易场景(简称“光—充”),不需要通过第三方直接进行电能交易。最后对提出的互动模型进行验证,仿真结果表明:光伏用户与充电站进行协议交易时,双方经济效益均得到提高,对电网而言虽然收益下降,但是充电站合理地制定充电策略,有助于促进盈余光伏就地消纳,同时减小与电网交互功率的波动,利于电网安全稳定运行。

1 “光—充”互动场景及交易协议

1.1 “光—充”协议交易场景

光伏用户内部包括电力负荷和光伏发电系统。光伏发电有盈余时,可以向外销售电能,获得额外收入。在传统的电能交易场景中,光伏用户的多余电量只能向电网销售,而充电站只能向电网购买电能,其能量管理系统以充电成本最小为其制定合理的充电策略。

实际上,光伏用户与充电站有充足的理由签订

电能交易协议,从而直接进行电能交易。近年来中国正逐步降低对光伏发电的补贴力度,积极推进平价上网^[16]。此外,在电力市场中,由于电网的售电电价包含从发电侧到用电侧的输配电费用,故电网的售电电价一般高于上网电价。因此光伏用户将有兴趣参与与充电站的直接交易,通过协商出比上网电价更高的电价,以获得更高的售电收入。对于充电站而言,如果与光伏用户协商的电价比较低,直接向光伏用户购买电能,将有效降低用电成本。在这个交易过程中,光伏用户和充电站各得其所。电网公司一般不会主动参与光伏用户和充电站的互动,所以该文不考虑电网公司参与该交易场景的情况。光伏用户和充电站的协议交易场景如图1所示。

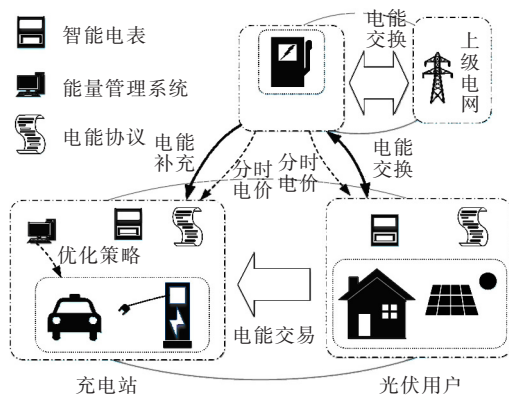


图1 “光—充”协议交易场景

Figure 1 Scenarios of agreement transactions between the photovoltaic user and the charging station

该文提出的交易协议主要是作为光伏用户和充电站进行直接电能交易的共识规则。签订协议之后,光伏用户根据内部的光伏发电和负荷消耗情况,判断光伏发电是否有盈余,若光伏发电不足时,向电网购买电能;若光伏有盈余时,将信息传给充电站,然后充电站合理地安排充电策略,向光伏用户购买电能。

1.2 基于智能合约的协议执行

智能合约是一套数字定义的合同,可以在不依赖第三方的情况下进行可信交易,只要触发合同的相应条件,合约参与方就能根据智能合约的内容自动达成交易,实现接收价值或者发送价值,其本质就是一段运行在区块链网络的代码逻辑^[17]。交易的

参与者都配备了智能电表,区块链网络与之相关联,并记录参与者的交易状态,以便任何参与者都能够看到^[18]。如图2所示,智能合约有以下3个功能^[19]:

- 1) 协商出令双方满意的交易电价和功率;
- 2) 生成控制指令,用于控制双方物理硬件,包括开关、变换器等;
- 3) 根据协商和实际操作的结果,计算出双方交易的金额,并由智能合约完成交易资金的转移。

该交易过程是完全自主完成的,不依赖第三方的管理,从而节省涉及中介的成本,而且所有的数据都是可以共享的,所以不存在数据篡改和欺诈的情况^[20]。

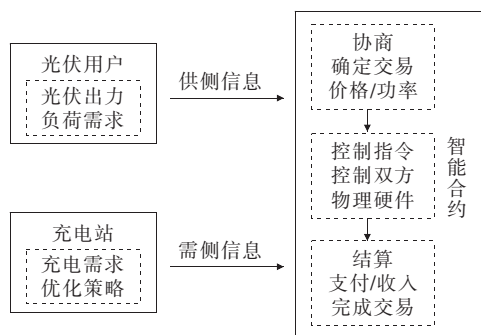


图2 基于智能合约的协议交易

Figure 2 Protocol implementation based on smart contract

光伏用户和充电站的目的都是逐利,在各自负荷规模以及设备容量都确定的情况下,光伏用户希望商定较高的电价以获得较高的售电收入,充电站希望光伏用户的报价电价较低,从而降低购电成本,两者存在利益冲突。双方需要通过协商,获得合理的协议电价与交易的电能,实现两者的利益均衡,提高双方参与协议交易的意愿。因此该文提出假设:在协议交易的场景中,双方协商的交易电价是固定电价,相对于双方分别独立运行,当光伏用户增加的收益与充电站减少的成本相等时,双方协商成功。

2 数学模型及求解

2.1 光伏用户模型

光伏用户的交易对象包括充电站和电网,光伏用户的运行收益包括向充电站售电的收入 $f_{\text{user}}^{\text{sta}}$ 和向供电公司售电的收入 $f_{\text{user}}^{\text{grid}}$;运行成本包括向电网

购买电能的支出 $C_{\text{grid}}^{\text{user}}$ 和光伏板的维护成本 $C_{\text{user,PV}}$ 。光伏用户总收益为

$$F_{\text{user}} = f_{\text{user}}^{\text{sta}} + f_{\text{user}}^{\text{grid}} - C_{\text{grid}}^{\text{user}} - C_{\text{user,PV}} \quad (1)$$

$$f_{\text{user}}^{\text{sta}} = \sum_{t=1}^T e_{\text{user}}^{\text{sta}} P_{\text{user}}^{\text{sta}}(t) \Delta t \quad (2)$$

$$f_{\text{user}}^{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T e_{\text{gb}}(t) P_{\text{user}}^{\text{grid}}(t) \Delta t \quad (3)$$

$$C_{\text{grid}}^{\text{user}} = \sum_{t=1}^T e_{\text{gs}}(t) P_{\text{grid}}^{\text{user}}(t) \Delta t \quad (4)$$

$$C_{\text{user,PV}} = \sum_{t=1}^T m_{\text{PV}} P_{\text{PV}}(t) \Delta t \quad (5)$$

式(2)~(5)中 $e_{\text{user}}^{\text{sta}}$ 、 $P_{\text{user}}^{\text{sta}}(t)$ 分别为光伏用户和充电站交易的电价和功率； $e_{\text{gs}}(t)$ 和 $e_{\text{gb}}(t)$ 分别为电网的售电电价和光伏上网电价； $P_{\text{grid}}^{\text{user}}(t)$ 和 $P_{\text{user}}^{\text{grid}}(t)$ 分别为光伏用户向电网购电功率和售电功率； m_{PV} 为光伏板的单位产能运行成本^[21]； $P_{\text{PV}}(t)$ 为光伏用户光伏系统的出力。

光伏用户光伏系统由几个太阳能电池串联或者并联组成,光伏阵列输出的功率主要受光照强度、天气变化、光伏板电池温度、设备老化、表面污染等因素的影响^[22-23],即

$$P_{\text{PV}} = S_{\text{PV}} K_{\text{PV}} \frac{R_{\text{T}}}{R_{\text{STC}}} [1 + \beta_{\text{PT}}(T_{\text{B}} - T_{\text{BSTC}})] \quad (6)$$

式中 S_{PV} 为光伏板的额定功率, kW; K_{PV} 为光伏板的降额系数,代表光伏阵列与光伏电池板额定条件相比,在实际运行条件下的输出,也被称为光伏板的效率; R_{T} 、 R_{STC} 分别为光伏板上实际的光照强度和额定条件下的光照强度, kW/m², R_{STC} 取值为 1 kW/m²; β_{PT} 为功率-温度系数(%/°C); T_{B} 、 T_{BSTC} 分别为光伏电池的实际温度和额定温度, °C, T_{BSTC} 取 25 °C^[24]。

光伏用户包括功率平衡约束和传输功率约束,即

$$P_{\text{grid}}^{\text{user}}(t) + P_{\text{PV}}(t) = P_{\text{user,l}}(t) + P_{\text{user}}^{\text{sta}}(t) + P_{\text{user}}^{\text{grid}}(t) \quad (7)$$

$$0 \leq P_{\text{grid}}^{\text{user}}(t) \leq P_{\text{grid,max}}^{\text{user}} \quad (8)$$

$$0 \leq P_{\text{user}}^{\text{grid}}(t) \leq P_{\text{user,max}}^{\text{grid}} \quad (9)$$

式(7)~(9)中 $P_{\text{user,l}}(t)$ 为光伏用户的负荷功率; $P_{\text{grid,max}}^{\text{user}}$ 、 $P_{\text{user,max}}^{\text{grid}}$ 分别为光伏用户向电网购电和售电功率的上限。

2.2 充电站模型

充电站的交易对象包括光伏用户和电网,充电站

总的运行成本包括向光伏用户购买电能的成本 $C_{\text{user}}^{\text{sta}}$ 、向配电网购买电能的成本 $C_{\text{grid}}^{\text{sta}}$ 以及电动汽车电池的老化成本 $C_{\text{sta,bat}}$ 。充电站总的运行成本为

$$F_{\text{sta}} = C_{\text{grid}}^{\text{sta}} + C_{\text{user}}^{\text{sta}} + C_{\text{sta,bat}} \quad (10)$$

$$C_{\text{grid}}^{\text{sta}} = \sum_{t=1}^T e_{\text{gs}}(t) P_{\text{grid}}^{\text{sta}}(t) \Delta t \quad (11)$$

$$C_{\text{user}}^{\text{sta}} = \sum_{t=1}^T e_{\text{user}}^{\text{sta}} P_{\text{user}}^{\text{sta}}(t) \Delta t \quad (12)$$

$$C_{\text{sta,bat}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{EV}}} \sum_{t=1}^T f_{\text{b}} S_{\text{bN},i} Z_{\text{b}} \frac{S_{\text{b},i}(t) - S_{\text{b},i}(t-1)}{2 \times (1 - S_{\text{H}})} \quad (13)$$

式(13)中 N_{EV} 为电动汽车总数; f_{b} 为电动汽车电池的单位容量的价格; $S_{\text{bN},i}(t)$ 为第 i 辆电动汽车电池的额定容量; Z_{b} 为电动汽车电池的损失系数; S_{H} 为电动汽车电池的报废容量; $S_{\text{b},i}(t)$ 为第 i 辆电动汽车在 t 时刻的储能量。电动汽车充电模型为

$$S_{\text{b},i}(t) = S_{\text{b},i}(t-1) + \eta_{\text{c},i} P_{\text{c},i}(t) h_{\text{EV},i}(t) \Delta t \quad (14)$$

$$S_{\text{OC,b},i}^{\text{min}} S_{\text{bN},i} \leq S_{\text{b},i}(t) \leq S_{\text{OC,b},i}^{\text{max}} S_{\text{bN},i} \quad (15)$$

$$S_{\text{b},i}(T) = S_{\text{OC,ex},i} S_{\text{bN},i} \quad (16)$$

$$0 \leq P_{\text{c},i}(t) \leq P_{\text{c},i}^{\text{max}} \quad (17)$$

式(14)~(17)中 $P_{\text{c},i}(t)$ 为第 i 辆电动汽车在 t 时刻的充电功率; $h_{\text{EV},i}(t)$ 为第 i 辆电动汽车在 t 时刻的入网状态偏好^[2]; $\eta_{\text{c},i}$ 为第 i 辆电动汽车的充电效率; $S_{\text{OC,b},i}^{\text{max}}$ 、 $S_{\text{OC,b},i}^{\text{min}}$ 分别为第 i 辆电动汽车的荷电状态(state of charge, SOC)上、下限; $S_{\text{OC,ex},i}$ 为调度周期结束时第 i 辆电动汽车期望满足的 SOC 值; $P_{\text{c},i}^{\text{max}}$ 为第 i 辆电动汽车电池的充电功率的最大值。

充电站满足功率平衡约束为

$$P_{\text{grid}}^{\text{sta}}(t) + P_{\text{user}}^{\text{sta}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{EV}}} P_{\text{c},i}(t) h_{\text{EV},i}(t) \quad (18)$$

充电站与电网、光伏产消者之间的交互功率约束为

$$0 \leq P_{\text{grid}}^{\text{sta}}(t) \leq P_{\text{grid,max}}^{\text{sta}} \quad (19)$$

$$0 \leq P_{\text{user}}^{\text{sta}}(t) \leq P_{\text{user,max}}^{\text{sta}}(t) \quad (20)$$

$$P_{\text{user,max}}^{\text{sta}}(t) = \max [P_{\text{PV}}(t) - P_{\text{user,l}}(t), 0] \quad (21)$$

式(19)~(21)中 $P_{\text{grid,max}}^{\text{sta}}$ 为电网向充电站传输功率的上限; $P_{\text{user,max}}^{\text{sta}}(t)$ 为充电站向光伏产消者购电功率的上限。

2.3 协商模型求解

在光伏发电有盈余时,光伏用户参与协议交易的前提是协议电价高于光伏上网电价。该文假设当光伏用户增加的收益与充电站减少的成本相等时,双方达成共识,即

$$F_{user} - F_{user}^0 = F_{sta} - F_{sta}^0 \quad (22)$$

式中 F_{user} 、 F_{sta} 分别为协议交易场景中光伏用户的总收益和充电站的总成本; F_{user}^0 、 F_{sta}^0 分别为双方独立运行场景中光伏用户的总收益和充电站的总成本。

充电站模型是一个典型的线性规划模型(linear programming, LP),该文使用 Gurobi 求解器求解。智能合约协商的求解流程如图 3 所示。

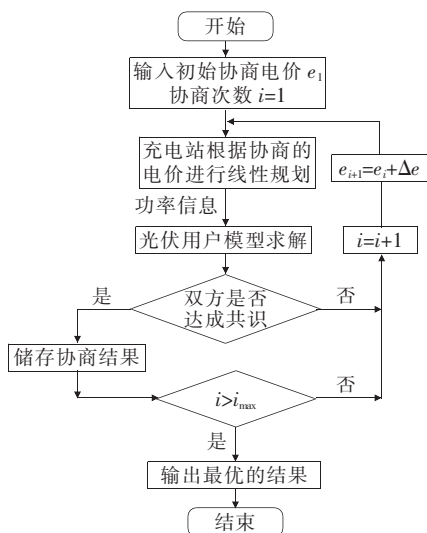


图 3 求解流程

Figure 3 Solution flow chart

3 算例分析

3.1 基础数据

该文以 Python 作为程序开发环境,时间尺度为 24 h,选取中国中部某地区作为研究地点,光伏出力参考 NASN 系统,根据该区域的太阳能资源,如图 4 所示,利用 HOMER 软件仿真得出。光伏用户的负荷类型为商业负荷,光伏用户负荷和发电情况如图 5 所示,可以观察出在白天光伏发电出现了较大的过剩现象。配电公司的售电电价是峰谷分时电价,光伏上网电价是固定电价,具体如表 1 所示。

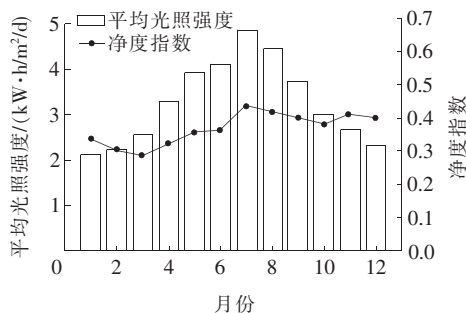


图 4 太阳能资源

Figure 4 Solar resource

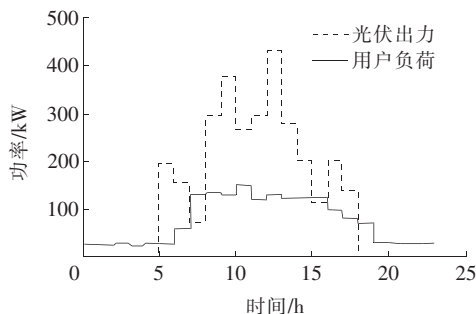


图 5 光伏用户典型日负荷和发电曲线

Figure 5 Typical daily load and power generation curve of the photovoltaic user

表 1 用电时段及电价

Table 1 Table of time period and price of electricity

元/(kW·h)		
时段	售电电价	上网电价
19:00—22:00	0.910 3	0.35
08:00—11:00	0.810 3	0.35
15:00—19:00		
07:00—08:00		
11:00—15:00	0.660 3	0.35
22:00—23:00		
23:00—07:00	0.460 3	0.35

该文根据参考文献[2]中充电汽车的数据,考虑充电站一天 24 h 内总共有 100 辆电动汽车充电,电动汽车电池容量满足 20~30 kW·h 的均匀分布,起始 SOC 满足 0.1~0.5 的均匀分布,额定充电功率满足 4~6 kW 的均匀分布,期望的 SOC 为 0.9。根据电动汽车的行驶特性,可分为早晚混合型(EV1)、白班型(EV2)、夜班型(EV3)3 类,具体入网状态偏好见参考文献[2]。电动汽车电池老化成本的参数见参考文献[4]。

该文在配电公司实行分时电价的环境下考虑以

下2种不同的场景:①独立运行场景:光伏用户和充电站根据自身用电情况,单独与该区域内的配电公司进行电能交易,两者之间没有电能交易。②协议交易场景:应用该文提出的交易协议,使得光伏用户在光伏发电有盈余时,向充电站供电。

3.2 结果分析

在独立运行场景中,为了减少充电成本,充电站负荷集中在电网电价较低的时段,容易引起新的负荷尖峰,如图6所示。

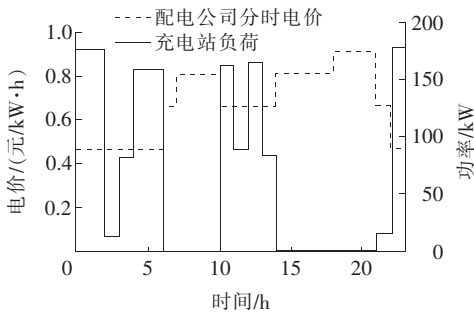


图6 独立运行场景的充电站日负荷

Figure 6 Daily load of charging station in independent operation scenario

光伏用户增加的收益曲线在协议电价分别等于谷时段电价和平时段电价时产生突变,如图7所示。随着协议电价的增加,充电站减少的成本随之减小,并与光伏用户增加的收益曲线有2个交点,协议电价分别为0.445 77、0.505 15元/kW·h。从经济学的角度考虑,双方协商成功对应的电价取0.445 77元/kW·h。下面在协议交易场景中取该电价进行分析。

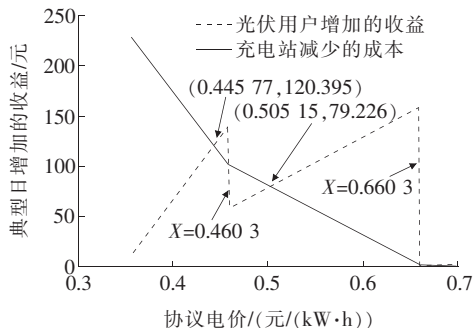


图7 协议电价的灵敏度分析

Figure 7 Sensitivity analysis of negotiated electricity price

在协议交易场景中,由于光伏用户与充电站之间直接进行能量交易,充电站向配电公司购买的电能和光伏向配电公司输送的电能大大降低,如图8

所示。图9进一步对比了2种场景与上级电网交互的功率(交互功率为正值代表向上级电网购电,负值代表向上级电网输送功率)。独立运行时,充电站为了降低成本,将充电负荷集中在电价较低的时段(特别是夜间),白天时段的大部分盈余光伏只能向上级电网倒送,造成与上级电网交互功率曲线的波动比较剧烈。在协议交易场景中,由于充电站的充电需求转移到白天光伏有盈余的时段,能够有效促进盈余光伏就地消纳,同时减少在夜间的负荷需求,避免造成新的负荷尖峰。总的来看,协议交易场景实现削峰填谷,与上级电网交互功率曲线波动减小。

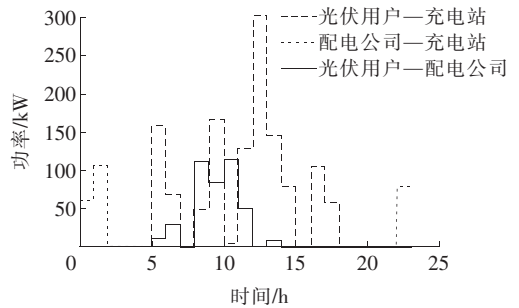


图8 协议交易场景的功率交互

Figure 8 Power interaction in protocol transaction scenario

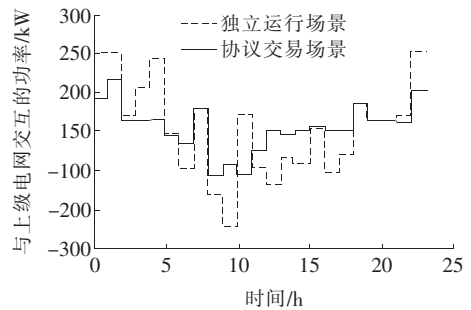


图9 与上级电网交互功率的对比

Figure 9 Comparison with the interactive power of the superior grid

一天内2种场景各主体的经济效益如图10所示。与独立运行场景相比,光伏用户收益增加了42.61%,充电站成本减小了6.33%,配电公司收益减少了47.05%。光伏用户和充电站在协议交易场景中的经济效益均得到提高,换言之,协议的双方各得其所。虽然配电公司的收益下降,但是根据上述分析可以看出,与电网的交互功率的波动减小,利于系统安全稳定运行。

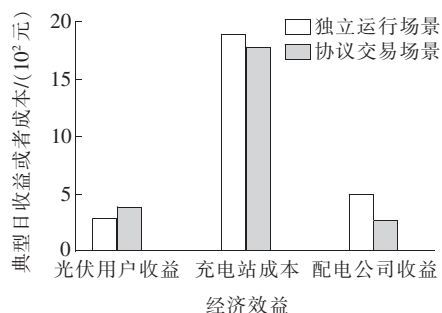


图 10 经济效益对比

Figure 10 Comparison of economic benefits

4 结语

该文基于智能合约构建光伏用户与充电站的协议交易场景,不通过第三方直接进行电能交易;然后,考虑光伏用户收益和充电总成本构建双方直接交易的数学模型;最后对提出的互动模型进行验证。仿真结果表明,光伏用户与充电站进行协议交易时,双方经济效益均得到提高。对电网而言虽然收益下降,但是充电站合理地制定充电策略有助于促进盈余光伏的就地消纳,同时与电网交互功率的波动减小,利于电网安全稳定运行。该文以双方增加的利益相等作为协商的共识,若可以结合其他利益分配理论,更加合理进行利益分配,将有助于提高双方参与交易的积极性。

参考文献:

- [1] 辛禾. 考虑多能互补的清洁能源协同优化调度及效益均衡研究[D]. 北京:华北电力大学,2019.
- [2] 张潇,栗然,马涛,等. 基于主从博弈和贪心策略的含电动汽车主动配电网优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020,40(4):103-110.
ZHANG Xiao, LI Ran, MA Tao, et al. Stackelberg game and greedy strategy based optimal dispatch of active distribution network with electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 103-110.
- [3] Rahbari-Asr N, Chow M, Chen J, et al. Distributed real-time pricing control for large-scale unidirectional V2G with multiple energy suppliers[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(5): 1953-1962.
- [4] 李咸善,陈敏睿,程杉,等. 基于双重激励协同博弈的含电动汽车微电网优化调度策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(7):2286-2296.
- [5] LI Xianshan, CHEN Minrui, CHENG Shan, et al. Research on optimal scheduling strategy of microgrid with electric vehicles based on dual incentive cooperative game[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2286-2296.
- [6] 程杉,陈梓铭,徐康仪,等. 基于合作博弈与动态分时电价的电动汽车有序充放电方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21):15-21.
CHENG Shan, CHEN Ziming, XU Kangyi, et al. An orderly charging and discharging method for electric vehicles based on a cooperative game and dynamic time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 15-21.
- [7] 程杉,倪凯旋,苏高参,等. 基于 DAPSO 算法的含分布式电源的配电网重构[J]. 高压电器, 2019, 55(7):195-202.
CHENG Shan, NI Kaixuan, SU Gaocan, et al. Reconfiguration of distribution network with distributed generations based on DAPSO algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7):195-202.
- [8] 于大洋,宋曙光,张波,等. 区域电网电动汽车充电与风电协同调度的分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 24-29.
YU Dayang, SONG Shuguang, ZHANG Bo, et al. Synergistic dispatch of PEVs charging and wind power in chinese regional power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 24-29.
- [9] 彭曙蓉,黄土峻,李彬,等. 基于风电功率预测的电动汽车调价策略[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 114-119.
PENG Shurong, HUANG Shijun, LI Bin, et al. Wind-power prediction based on the pricing strategy of electric vehicle charging[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 114-119.
- [10] 张勇军,张懿恒,刘斯亮,等. 考虑分布式光伏与储能接入的配变双层规划[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24):9-15.
ZHANG Yongjun, ZHANG Siheng, LIU Siliang, et al. Dual planning of a distribution transformer considering the impact of distributed photovoltaics and energy storage access[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24):9-15.
- [11] 郭瑶,张新慧,彭克,等. 考虑电动汽车与光伏电源联动的

- 配电网电压调控策略[J]. 电测与仪表, 2019, 56(7): 75-83.
- GUO Yao, ZHANG Xinhui, PENG Ke, et al. Voltage regulation strategy of distribution network considering the joint action of electric vehicle and photovoltaic power supply[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(7): 75-83.
- [11] 王合建, 王栋, 杨珂. 基于物联网标识技术的分布式光伏数据共享系统技术架构与平台建设[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(8): 69-75.
- WANG Hejian, WANG Dong, YANG Ke. Technical architecture and platform construction of distributed photovoltaic data sharing system based on internet of things identification technology [J]. *Power System and Clean Energy*, 2019, 35(8): 69-75.
- [12] 石方迪, 刘敦楠, 余涛, 等. 适应光伏学习曲线的分布式交易过网费机制[J]. 智慧电力, 2020, 48(3): 96-103.
- SHI Fangdi, LIU Dunnann, YU Tao, et al. Probe into mechanism of use of system charge in distributed trading adapted to photovoltaic learning curve [J]. *Smart Power*, 2020, 48(3): 96-103.
- [13] 宁月, 胡志坚, 林伟伟, 等. 基于博弈论的“源—网—荷”多主体利益协调互动的 ADN 分层规划[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 63-72.
- NING Yue, HU Jianzhi, LIN Weiwei, et al. ADN hierarchical planning for multi-agent interest coordination interaction of “source-net-load” based on gametheory[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(1): 63-72.
- [14] 曾嘉志, 赵雄飞, 李静, 等. 用电侧市场放开下的电力市场多主体博弈[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 129-136.
- ZENG Jiashi, ZHAO Xiongfei, LI Jing, et al. Game among multiple entities in electricity market with liberalization of power demand side market[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(24): 129-136.
- [15] 靳开元, 杨建华, 陈正, 等. 基于区块链的分布式光伏就地消纳交易模式研究[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 8-16.
- JIN Kaiyun, YANG Jianhua, CHEN Zheng, et al. Blockchain-based transaction model of distributed photovoltaic generation for local power consumption[J]. *Electric Power*, 2021, 54(5): 8-16.
- [16] 马腾飞, 裴玮, 肖浩, 等. 基于纳什谈判理论的风—光—氢多主体能源系统合作运行方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 25-39+395.
- MA Tengfei, PEI Wei, XIAO Hao, et al. Cooperative operation method for wind-solar-hydrogen multi-agent energy system based on nash bargaining theory[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(1): 25-39+395.
- [17] 吴晓锐. 家庭与社区能量管理方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [18] Kim G, Park J, Ryou J A. Study on utilization of blockchain for electricity trading in microgrid [C]//2018 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp), Shanghai, China; IEEE, 2018.
- [19] Thomas L, Zhou Y, Long C, et al. A general form of smart contract for decentralized energy systems management[J]. *Nature Energy*, 2019, 4(2): 140-149.
- [20] Sabounchi M, Wei J. Towards resilient networked microgrids: Blockchain-enabled peer-to-peer electricity trading mechanism[C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, China; IEEE, 2017.
- [21] 杨铮, 彭思成, 廖清芬, 等. 面向综合能源园区的三方市场主体非合作交易方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 32-39+47.
- YANG Zheng, PENG Sicheng, LIAO Qingfen, et al. Non-cooperative trading method for three market entities in integrated community energy system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(14): 32-39+47.
- [22] 侯佳松, 王侃宏, 石钰杨, 等. 邯郸地区温度和灰尘对独立太阳能光伏发电系统的影响[J]. 节能, 2011, 30(10): 49-52+3.
- HOU Jia, WANG Kanhong, SHI Yuyang, et al. The influence of temperature and dust to the independent system of solar photovoltaic generation in Handan[J]. *Energy Conservation*, 2011, 30(10): 49-52+3.
- [23] Garni H Z A, Awasthi A, Ramli M A M. Optimal design and analysis of grid-connected photovoltaic under different tracking systems using HOMER[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 155: 42-57.
- [24] 赵长龙. 微网运行经济型及 HOMER 软件应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.