

P2P 交易市场下考虑农机电电池的农村集中-分散式 储能系统双层优化调控研究

罗 西, 韩明玥, 郑艳宁, 黄文渊

(西安建筑科技大学建筑设备科学与工程学院, 西安 710055)

摘 要: 由于集中优化的常规储能系统调控策略难以满足农村集中-分散式储能的运行需求,以关中平原某典型农村为例,提出一种基于组合双向拍卖的分散式储能点对点(P2P)交易机制,在交易环境下建立基于主从博弈的农村集中-分散式储能系统双层优化调控模型并计算求解。结果表明:P2P交易在数量与时间上均受农业生产规律的高度影响;P2P交易使集中-分散式储能系统中各主体的运行成本降低4.96%,碳排放量降低10.41%,光伏消纳率提升18.04%;不同类型农户的年用电成本均因分散式储能容量的增加而降低,且引入P2P交易后降幅更为显著,对于屋顶光伏装机大、用电需求小、储能资源充足的农户,其成本降幅尤为突出;储能运营商则会因分散式储能容量的增加而收益受损,且引入P2P交易后收益会进一步降低,但可通过适当收取运营管理费的方式得到补偿。

关键词: 点对点交易; 农机电电池; 分散式储能; 集中式储能; 优化调控; 组合双向拍卖

中图分类号: TK01

文献标志码: A

0 引 言

农村地区用能方式相对落后,传统能源的使用对生态环境造成严重破坏。尽管农村可再生能源丰富且利用条件优越,但随机波动特征使得可再生能源系统供需难以动态平衡^[1]。因此,为了保障农村可再生能源系统的稳定性与可靠性,储能设备的有效利用至关重要。

储能设备的应用方式基本可分为集中式与分散式两种^[2]。集中式储能是由第三方独立投资并通过集中调控进行能源充放的储能系统,容量相对较大;分散式储能则是建立在用户端的小型储能系统^[3],容量相对较小。农村地区地广人稀,土地、屋顶等空间资源丰富,具备集中式储能的推广应用条件。随着农业机械化、电气化的快速发展,蓄电型农机在农村日益普及,闲置期的农机电电池可作为分散式储能资源被加以利用。建立农村集中-分散式储能系统,充分利用农村地区各类储能资源,能够有效解决供需动态匹配问题,是提升农村地区可再生能源利用率创新途径。

充分利用集中-分散式储能系统的核心在于横向分散式储能之间、纵向集中-分散式储能之间的协同优化调控机制设计。由于涉及主体复杂多元且储能设备参数各异,仅仅依靠传统的集中式分级调控模式已难以满足集中-分散式储能系统多目标、多要素、多维度的调控需求^[4]。随着数字信息技术

的快速发展,点对点(peer to peer, P2P)能源交易模式作为能源资源优化配置的高效手段,为进一步提升农村集中-分散式储能系统的优化调控效果提供了可能。2022年国家发改委在《关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》^[5]中提出,应健全分布式发电市场化交易机制,鼓励分布式光伏、分散式风电等主体与周边用户直接交易,以增强新能源就近消纳能力。该政策导向的P2P分布式运营服务模式强调“弱中心化”,由利益主体自行决策、相互通信、达成合约并自动执行^[6]。合理设计P2P市场交易机制,进而提出交易市场下的集中-分散式储能协同优化调控方法,能够通过能源的商品属性激发提高需求侧储能资源的利用效率,对提升可再生能源的就地消纳能力将发挥重要作用。

近年来,中国部分地区已开展分布式能源交易试点,积极探索P2P交易模式的实际应用^[7]。目前,学界对于分布式能源系统中的P2P交易应用已展开了大量研究。文献[8]通过建立多园区P2P交易优化模型,构建了基于非对称议价的收益分配模型,在最小化多园区联合运行成本的同时实现了收益的公平分配;文献[9]通过建立社区微网用户之间的P2P交易模型,有效提高了社区微网的整体用户收益;文献[10]在社区微网系统中基于连续双边拍卖机制,搭建了日前阶段多类型产消者P2P能量交易框架,在有效保护产消者交易隐私性的同时提高了其经济效益。然而,以上研究的应用场

收稿日期: 2025-02-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52378109)

通信作者: 罗 西(1988—), 女, 博士、教授, 主要从事区域综合能源系统规划方面的研究。xiluo@xauat.edu.cn

景多集中于城市社区,常规形式的储能也可提供稳定电力以适应长期的能源调度需求。而在农村 P2P 能源交易市场,农机储能电池在可用容量、运行参数等方面受到农户生产生活规律的高度影响,现有基于常规储能的系统优化调控策略难以适用,多层的能源市场交易架构更增加了优化调控的复杂性,需要针对性地提出从交易策略设计到系统运行调控的成套方法,以满足农村集中-分散式储能系统的运行需求。

鉴于此,本文结合典型农村生产生活用能规律,提出一种基于组合双向拍卖的分散式储能 P2P 交易机制,在交易环境下建立基于主从博弈的农村集中-分散式储能系统双层优化调控模型,其上层以储能运营商收益最大为目标,下层以农户运行成本最低为目标。通过算例仿真对比分析是否考虑 P2P 交易情景下系统的优化调控结果,并探究 P2P 交易对不同评价指标的影响,进一步开展分散式储能容量的敏感性分析,验证模型的合理性,以期为农村储能资源的市场化运营提供科学参考。

1 基本架构

本文建立的集中-分散式储能系统拓扑结构如图 1 所示。该系统为双层结构,上层运营主体为储能运营商,下层运营主体为农户群体。储能运营商对集中式储能电站与光伏电站具有运营权,农户对分散式农机电池与屋顶光伏具有运营权。上层储能运营商向上与电网、向下与农户进行能源交易,下层分散式农户一方面相互之间进行能源交易,另一方面与电网及储能运营商进行能源交易。

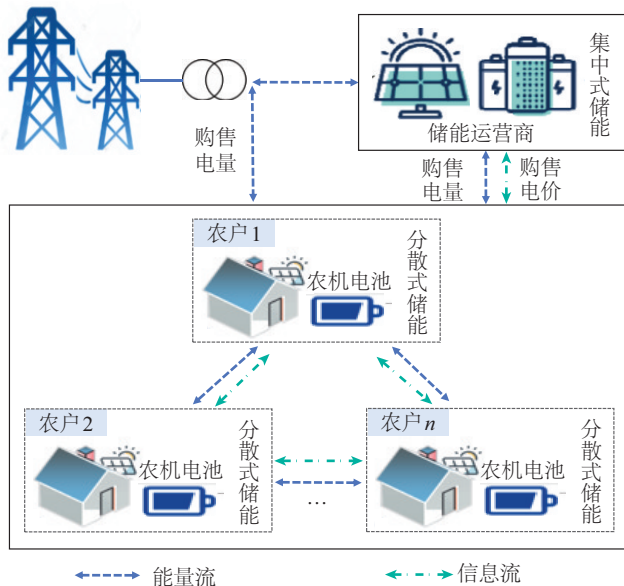


图1 集中-分散式储能系统拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of centralized-distributed energy storage systems

2 数学模型

由于能源交易的实施必要条件是不同主体的负荷差异足够突出,本文选取陕西关中平原某个用能多样化特征显著的农村作为典型,进行用能规律的现场调研。该村农户类型多样,有以葡萄等作物种植为主的种植型农户,以养羊为主的养殖型农户,以外出务工为主的务工型农户以及从事手工业、饮食业、服务业的其他类型农户。调研活动于 2024 年 11 月 29 日—12 月 3 日开展,为期 4 d。调研团队共发放问卷 192 份,回收有效问卷 184 份,有效回收率 95.83%。调研内容包括用能设备的类型、数量、性能参数、使用规律等。

2.1 分散式储能设备拥有情况

蓄电型农机在满足农业生产活动任务后,通常具有较长时间的闲置期,可将闲置期的农机电池作为分散式储能设备加以利用。在所调研的典型农村,常见蓄电型农机基本参数见表 1。通过表 1 可看出,电动三轮车在电池容量及每百户拥有量方面均较为可观,故选择电动三轮车电池作为分散式储能设备,以供后续建模分析。

表1 典型农村蓄电型农机基本参数统计

Table 1 Statistics on the basic parameters of battery-powered agricultural machinery in a typical village

设备	平均电池容量/(kW·h)	每百户拥有量/台
电动三轮车	2.70	77
电动喷雾器	0.11	88
电动割草机	0.24	1
电动旋耕机	0.16	2

2.2 电动三轮车使用规律

由于不同类型农户的电动三轮车使用规律不尽相同,需对农户进行分类分析,各类农户的数量占比结果如图 2 所示。

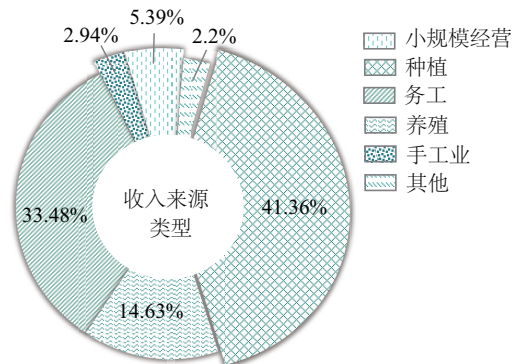


图2 典型农村农户收入来源类型统计

Fig. 2 Statistics on types of income sources of rural households in typical village

由图 2 可看出,因种植型、养殖型、务工型农户占比最高,本文以该 3 类农户为典型,分析其各自的用能规律。通过对调研结果进行统计分析,得到 3 类农户的电动三轮车逐时使用概率如图 3 所示。

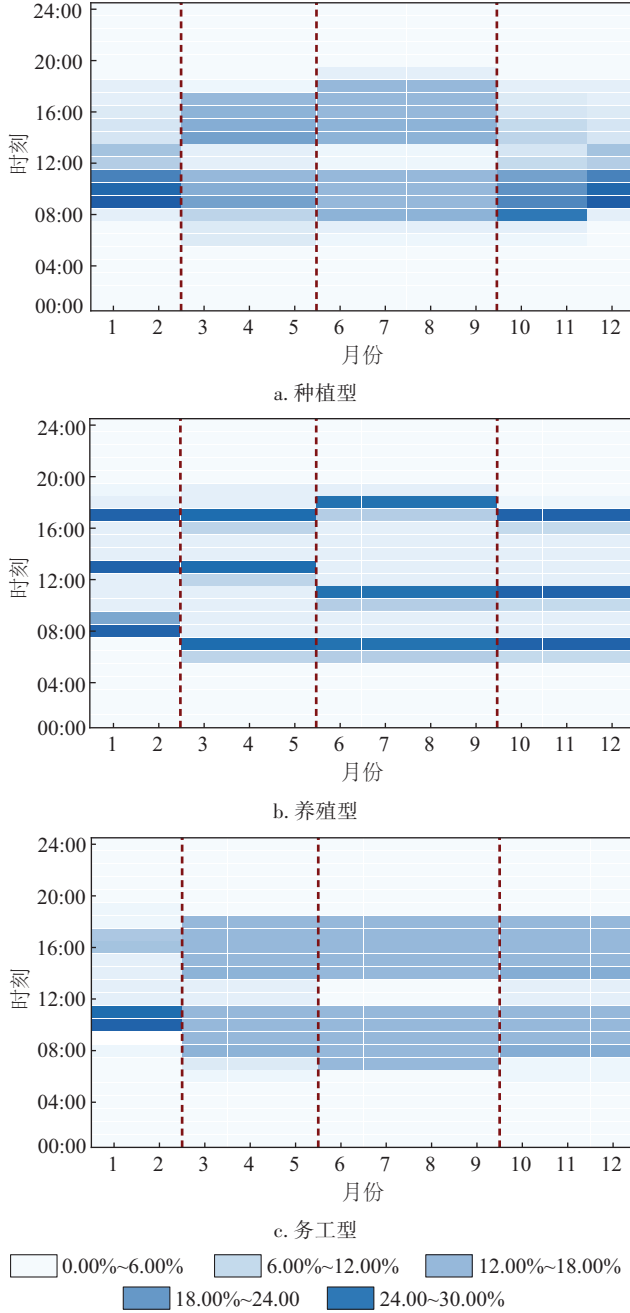


图 3 典型农户电动三轮车逐时使用概率

Fig. 3 Hourly use probabilities of electric tricycles in typical rural households

对比发现,受劳作规律影响,三类农户的电动三轮车使用均具有显著的季节性特点:1—2月,养殖型农户使用电动三轮车进行短途饲料运输,其余农户使用频率较低;3—5月,养殖型农户使用电动三轮车进行草场巡查与饲料运输,其余农户作为代步工具使用;6—9月,养殖型农户使用电动三轮

车进行放牧管理和育肥作业,务农型农户用于物资运输,务工型农户作为代步工具使用;10—12月,养殖型农户使用电动三轮车运输养殖牲畜及冬季备料,其余农户使用频率较低。基于此,将全年划分为准备期(1—2月)、劳作期(3—5月)、收获期(6—9月)、修整期(10—12月)4个阶段,相应确定 4 个典型日。

2.3 设备分项数学模型

2.3.1 光伏组件出力模型

光伏组件的发电功率可采用式(1)~式(3)计算^[11],具体模型参数如表 2 所示。

$$P_{PV,t} = A_{PV} R_t \eta_{PV,t} \quad (1)$$

$$\eta_{PV,t} = \eta_{r,PV} \eta_{PV} \left[1 - N_T (T_{PV,t} - T_{ref}) \right] \quad (2)$$

$$T_{PV,t} = T_{a,t} + \left(\frac{T_{rate} - 20}{800} \right) R_t \quad (3)$$

式中: $P_{PV,t}$ —— t 时刻的光伏出力功率,kW; A_{PV} ——光伏组件的面积, m^2 ; R_t —— t 时刻太阳辐照度, kW/m^2 ; $\eta_{PV,t}$ —— t 时刻光伏组件的效率,%; $\eta_{r,PV}$ ——光伏组件的参考模块效率,%; η_{PV} ——光伏组件功率调节效率; N_T ——效率温度系数, $^{\circ}C^{-1}$; $T_{PV,t}$ —— t 时刻光伏发电系统的工作温度, $^{\circ}C$; T_{ref} ——参考条件下的电池温度, $^{\circ}C$; $T_{a,t}$ —— t 时刻环境空气温度, $^{\circ}C$; T_{rate} ——电池的额定工作温度, $^{\circ}C$ 。

表 2 光伏组件出力模型参数设置

Table 2 Parameter setting of PV module output model

参数	数值	参数	数值
A_{PV}/m^2	1.28	$N_T/^{\circ}C^{-1}$	3.7×10^{-3}
$\eta_{r,PV}/\%$	15.50	$T_{ref}/^{\circ}C$	25
η_{PV}	1	$T_{rate}/^{\circ}C$	43

2.3.2 储能设备充放电模型

无论是集中式储能设备还是分散式储能设备,其充放电模型均可用式(4)~式(18)表示^[12]。

$$E_t = E_{t-1} + \left(\gamma_t^c P_t^c - \frac{P_t^{dc}}{\gamma_t^{dc}} \right) \Delta t \quad (4)$$

$$S_t^{soc} = \frac{E_t}{E_{rate}} \quad (5)$$

$$S_{soc}^{min} \leq S_t^{soc} \leq S_{soc}^{max} \quad (6)$$

$$S_{soc}^0 = S_{soc}^t \quad (7)$$

$$0 \leq E_t \leq E_{rate} \quad (8)$$

$$0 \leq P_t^c \leq P_{max}^c I_t^c \quad (9)$$

$$0 \leq P_t^{dc} \leq P_{max}^{dc} I_t^{dc} \quad (10)$$

$$I_t^c + I_t^{dc} \leq 1 \quad (11)$$

$$I_t^c \in \{0,1\}, I_t^{dc} \in \{0,1\} \quad (12)$$

$$E_{id,t} \geq 75\% E_{rate} \quad (13)$$

$$I_t^c = 0, t \in \{t^{pr,st}, t^{pr,et}\} \quad (14)$$

$$P_t^c \geq 0, \forall t \in T^{id} \quad (15)$$

$$P_t^c = 0, \forall t \notin T^{id} \quad (16)$$

$$E_{\text{td},t} = \sum_{t \in T^{\text{id}}} P_t^c \Delta t \quad (17)$$

$$t^c = t^{c,\text{et}} - t^{c,\text{st}}, t^{c,\text{st}}, t^{c,\text{et}} \in T^{\text{id}} \quad (18)$$

式中: E_t —— t 时刻储能电池的电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $\gamma_i^c, \gamma_i^{\text{dc}}$ ——储能电池的充放电效率; P_t^c, P_t^{dc} —— t 时刻储能电池的充放电功率, kW ; S_t^{soc} ——储能电池在 t 时刻的荷电状态; E_{rate} ——储能电池的额定容量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $S_{\text{soc}}^{\text{max}}, S_{\text{soc}}^{\text{min}}$ ——储能电池的荷电状态上下界; $P_{\text{max}}^c, P_{\text{max}}^{\text{dc}}$ ——储能电池的最大充放电功率, kW ; I_t^c, I_t^{dc} —— t 时刻储能电池的充放电状态, 为取值 0 或 1 的变量, 其中 I_t^c 为 1 代表处于充电状态, I_t^{dc} 为 1 代表处于放电状态; $E_{\text{td},t}$ —— t 时刻为保证出行需求的储能电池电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $t^{\text{pr},\text{st}}, t^{\text{pr},\text{et}}$ ——分散式储能特有参数, 分别为农户偏好的分散式储能设备开始、结束使用时间; T^{id} ——分散式储能设备闲置(非工作)时间集合; t^c ——储能电池预设的最优充电时长, 确保充电过程在非工作时间内连续进行, 而不会被高负荷时段或 P2P 交易影响; $t^{c,\text{st}}, t^{c,\text{et}}$ ——储能电池充电起始、结束时间。

根据现场及文献调研, 取集中-分散式储能系统的模型参数如表 3 所示。根据图 3 所示的电动三轮车使用规律, 将各典型日内逐时使用概率超过 10% 的时段设定为农户偏好的电动三轮车放电时段, 不同类型农户偏好的电动三轮车使用时间参数见附录 A 表 A1, 不同类型农户的电动三轮车电池充电时间参数见附录 A 表 A2。

表 3 集中-分散式储能系统的模型参数设置

Table 3 Model parameter settings for centralized-distributed energy storage systems

设备	参数	数值
集中式储能 ^[13]	$E_{\text{rate}}/(\text{kW} \cdot \text{h})$	3000
	$P_{\text{max}}^{\text{cen},c}/\text{kW}$	2000
	$P_{\text{max}}^{\text{cen},\text{dc}}/\text{kW}$	2000
	$\gamma_i^{\text{cen},c}$	0.90
	$\gamma_i^{\text{cen},\text{dc}}$	0.90
	$E_{\text{rate}}^{\text{dis}}/(\text{kW} \cdot \text{h})$	2.70
分散式储能	$P_{\text{max}}^{\text{dis},c}/\text{kW}$	1.07
	$P_{\text{max}}^{\text{dis},\text{dc}}/\text{kW}$	2.04
	$\gamma_i^{\text{dis},c}$	0.96 ^[12]
	$\gamma_i^{\text{dis},\text{dc}}$	0.96 ^[12]
	$\gamma_i^{\text{dis},\text{dc}}$	0.96 ^[12]

3 调控策略

3.1 分散式储能 P2P 交易规则

3.1.1 组合双向拍卖交易流程

为满足分散式储能交易中储能用户的互补性和替代性需求, 解决常规单向拍卖中可能存在的垄断竞争问题, 研究者们提出基于组合双向拍卖的分散式储能 P2P 交易机制。组合双向拍卖是组合拍卖和双向拍卖的结合, 具有“多对多”

的市场结构, 能更好地在储能交易过程中支持买家表达其多样性需求。本文中基于组合双向拍卖的分散式储能 P2P 交易流程如图 4 所示。在集中-分散式储能系统中, 设有 $M = \{1, \dots, m, \dots, M\}$ 个储能卖家和 $N = \{1, \dots, n, \dots, N\}$ 个储能买家, 一天中可分为 T 个可供参与者拍卖储能电量的时段^[14]。

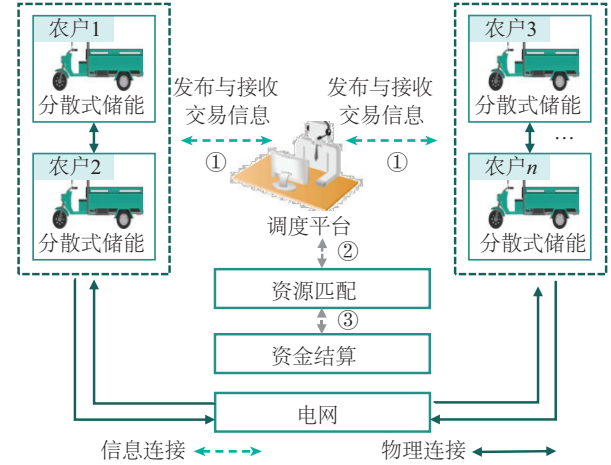


图 4 组合双向拍卖交易流程

Fig. 4 Trading process of combinatorial double auction

具体交易步骤为:

1) 调度平台发布投标开始信号, 买家和卖家分别以密封形式向调度平台提交购电需求、可售电量、投标价格(购电需求与可售电量不会在同一时间段发布), 之后调度平台发布投标结束信号。投标过程发布的信息可表示为:

$$Q_m^s = [q_{m,1}^s, \dots, q_{m,t}^s, \dots, q_{m,T}^s] \quad (19)$$

$$Q_n^b = [q_{n,1}^b, \dots, q_{n,t}^b, \dots, q_{n,T}^b] \quad (20)$$

$$\xi_m^s = [\xi_{m,1}^s, \dots, \xi_{m,t}^s, \dots, \xi_{m,T}^s] \quad (21)$$

$$\xi_n^b = [\xi_{n,1}^b, \dots, \xi_{n,t}^b, \dots, \xi_{n,T}^b] \quad (22)$$

式中: $q_{m,t}^s, q_{n,t}^b$ ——卖家 m 和买家 n 在第 t 时段的投标电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $\xi_{m,t}^s, \xi_{n,t}^b$ ——卖家 m 和买家 n 在第 t 时段的投标电价, 元/($\text{kW} \cdot \text{h}$)。

2) 调度平台根据投标信息, 以社会福利最大化为目标决定中标者。选出中标者后, 需要匹配买卖双方的供需并制定交易价格。资源匹配遵循两个原则: 一是价格优先原则, 当有多个农户进行报价时, 报价越高的买家优先级越高, 报价越低的卖家优先级越高; 二是时间优先原则, 当买卖双方的物品及价格相同时, 先进入市场的报价者优先交易。

$$C_e = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{n=1}^N \xi_{n,t}^b q_{n,t}^b \lambda_{n,t}^b - \sum_{m=1}^M \xi_{m,t}^s q_{m,t}^s \lambda_{m,t}^s \right) \quad (23)$$

$$\beta_t^{\text{P2P}} = \frac{\xi_{n,t}^b + \xi_{m,t}^s}{2} \quad (24)$$

式中: C_e ——社会福利, 卖家剩余与买家剩余之和, 亦等于买家出价与卖家要价之差; $\lambda_{n,t}^b$ ——买家 n 在第 t 时段的中标情况, 0-1 变量, 取值为 1 表示中标, 取值为 0 表示未中标; $\lambda_{m,t}^s$ ——卖家 m 在第 t 时段投标的中标情况, 其取值范围为 $[0, 1]$, 1 代表卖家 m 在 t 时段的投标量全部出售; β_t^{P2P} ——第 t 时段卖家 m 与买家 n 之间的交易电价, 元/($\text{kW} \cdot \text{h}$)。

$$P_t^{\text{stG}} \leq P_{\max}^{\text{een,dc}} \quad (36)$$

4) 功率平衡约束

$$P_t^{\text{s}} + P_t^{\text{bfG}} = P_t^{\text{b}} + P_t^{\text{stG}} \quad (37)$$

5) 储能运营商交易电价约束

$$\beta_t^{\text{dc}} \geq \beta_t^{\text{c}}, \forall t \quad (38)$$

$$\beta_t^{\text{stG}} \geq \beta_t^{\text{bfG}}, \forall t \quad (39)$$

4.2 下层模型

4.2.1 目标函数

农户的日运行成本 C 包括: 农户向电网购电的成本 C_G 、向储能运营商购电的成本 C_{E2U} 、分散式储能的运行维护成本 C_{OM} ^[15]、点对点交易的收益 C_{P2P} 以及余电上网的收益 C_{Re2G} , 可表示为^[16]:

$$C = C_G + C_{\text{E2U}} + C_{\text{OM}} - C_{\text{P2P}} - C_{\text{Re2G}} \quad (40)$$

$$C_G = \sum_{t=1}^T \beta_t^{\text{bfG}} P_t^{\text{G}} \Delta t \quad (41)$$

$$C_{\text{Re2G}} = \sum_{t=1}^T \beta_t^{\text{Re2G}} P_t^{\text{Re2G}} \Delta t \quad (42)$$

$$C_{\text{OM}} = \sum_{t=1}^T K_{\text{OM}} (P_t^{\text{dis,c}} + P_t^{\text{dis,dc}}) \Delta t \quad (43)$$

式中: β_t^{bfG} —— t 时段农户向电网购电的电价, 元/(kW·h); P_t^{G} —— t 时段农户向电网购电的功率, kW; β_t^{Re2G} ——余电上网电价, 元/(kW·h); P_t^{Re2G} —— t 时段余电上网功率, kW; K_{OM} ——分散式储能运行维护成本系数, 元/(kW·h), 本文取 0.005 元/(kW·h); $P_t^{\text{dis,c}}$ 、 $P_t^{\text{dis,dc}}$ ——分散式储能充放电功率, kW。

4.2.2 约束条件

1) 储能电池荷电状态约束, 如式(5)~式(7)所示。

2) 储能电池充放电约束, 如式(8)~式(18)所示。

3) 电量平衡约束

$$(P_t^{\text{G}} + P_t^{\text{dis,dc}} + P_t^{\text{b}} + P_t^{\text{PV}}) \Delta t + q_t^{\text{P2P}} = (P_t^{\text{dis,c}} + P_t^{\text{h}}) \Delta t \quad (44)$$

式中: P_t^{h} —— t 时段农户的用电功率, kW。

4) 点对点交易约束, 如式(27)~式(30)所示。

5) 点对点交易电价约束

$$\beta_t^{\text{PV2G}} \leq \beta_t^{\text{P2P}} \leq \beta_t^{\text{dc}} \leq \beta_t^{\text{bfG}} \quad (45)$$

4.3 不确定性处理

由于光伏出力受自然因素影响导致其出力具有随机性, 为确保系统调度策略的可靠性, 本文采用机会约束的方法来应对光伏出力的不确定性^[17]。本文中光伏的发电功率为:

$$P_{\text{PV},t} + P_{\text{PV},t}^{\text{cur}} = P_{\text{PV},t}^{\text{f}} \quad (46)$$

式中: $P_{\text{PV},t}^{\text{cur}}$ —— t 时刻的弃光功率, kW; $P_{\text{PV},t}^{\text{f}}$ —— t 时刻的光伏预测发电功率, kW。

本文将光伏出力的实际值看作预测值与随机误差之和, 且认为误差遵循方差为 σ_{PV}^2 的标准正态分布, 即:

$$P_{\text{PV},t} \sim P_{\text{PV},t}^{\text{f}} + N(0, \sigma_{\text{PV}}^2) \quad (47)$$

利用机会约束将式(44)转换为光伏不确定性下的电量

平衡约束:

$$\alpha \leq P_r[(P_t^{\text{G}} + P_t^{\text{dis,dc}} + P_t^{\text{b}} + P_t^{\text{PV}} - P_t^{\text{dis,c}} - P_t^{\text{h}}) \Delta t + q_t^{\text{P2P}}] \geq 0 \quad (48)$$

式中: α ——置信概率水平; $P_r(\cdot)$ ——满足条件的概率。

令随机变量的概率累积分布函数为 F , 根据概率统计相关理论, 式(48)可进一步转换为:

$$(P_t^{\text{G}} + P_t^{\text{dis,dc}} + P_t^{\text{b}} + P_t^{\text{PV}} - P_t^{\text{dis,c}} - P_t^{\text{h}}) \Delta t + q_t^{\text{P2P}} \geq F^{-1}(\alpha) \quad (49)$$

本文假设光伏的出力服从正态分布, 通过标准正态分布的分位点来获得反函数的解, 约束式(49)最终转换为:

$$(P_t^{\text{G}} + P_t^{\text{dis,dc}} + P_t^{\text{b}} + P_t^{\text{PV}} - P_t^{\text{dis,c}} - P_t^{\text{h}}) \Delta t + q_t^{\text{P2P}} \geq \eta^{-1}(\alpha) \sqrt{\sigma_{\text{PV}}^2} \quad (50)$$

式中: $\eta^{-1}(\alpha)$ ——标准正态分布的反函数; σ_{PV}^2 ——方差。

4.4 评价指标

4.4.1 环保性指标

环保性旨在农户尽可能地使用可再生能源发电或降低用电量, 从而减少向电网购电以达到减少碳排放的目的。本研究选取碳排放量作为环保性指标, 对比分析有无 P2P 交易的碳排放情况。

当农户安装户用光伏时, 农户全年碳排放量为^[18]:

$$I_{\text{EF}} = \sum_{t=1}^T P_t^{\text{G}} I_{\text{EF}}^{\text{G}} \Delta t + \sum_{t=1}^T P_{\text{PV},t} I_{\text{EF}}^{\text{PV}} \Delta t \quad (51)$$

式中: I_{EF}^{G} ——火力发电碳排放系数, 取值为 0.420 kg CO₂/(kW·h); $I_{\text{EF}}^{\text{PV}}$ ——光伏发电碳排放系数, 取值为 0.037 kg CO₂/(kW·h)。

4.4.2 技术性指标

光伏消纳旨在农户尽可能地利用本地光伏发电, 减少弃光现象, 从而提高可再生能源利用效率。选取光伏就地消纳率作为衡量指标, 对比分析有无 P2P 交易的光伏消纳情况, 其数学表达式为^[19]:

$$\mu_{\text{PV}} = \frac{\sum_{t=1}^T P_{\text{PV},t}^{\text{h}}}{\sum_{t=1}^T P_{\text{PV},t}} \times 100\% \quad (52)$$

式中: μ_{PV} ——光伏消纳率, %; $P_{\text{PV},t}^{\text{h}}$ —— t 时段光伏组件供农户自用的发电功率, kW。

4.5 计算求解

本文以 1 h 为时间步长、一个典型日内 24 h 可调控的总时段为计算周期, 通过 Matlab 调用 CPLEX 求解器求解。

5 算例分析

5.1 算例设置

本文设置以一个储能运营商为上层主体、4 个典型农户为下层主体的集中-分散式储能系统双层优化调控模型。综合考虑农户分类结果及屋顶光伏配置, 结合前述调研结果,

设置4个典型农户的屋顶光伏及分散式储能基本参数见表4,光伏采用“自发自用,余量上网”的使用模式。

表4 典型农户屋顶光伏及分散式储能基本参数

Table 4 Basic parameters of rooftop photovoltaics and distributed energy storage in typical rural households

编号	农户类型	屋顶光伏容量/kW	分散式储能容量/(kW·h)
1	种植型	0	2.70
2	种植型	5	2.70
3	养殖型	5	2.70
4	务工型	5	2.70

典型农户在不同典型日内的负荷需求及当地电网电价^[20]如图7所示,当地光电上网电价为0.3545元/(kW·h)^[21]。本文设置无P2P交易(场景1)和有P2P交易(场景2)进行对比。

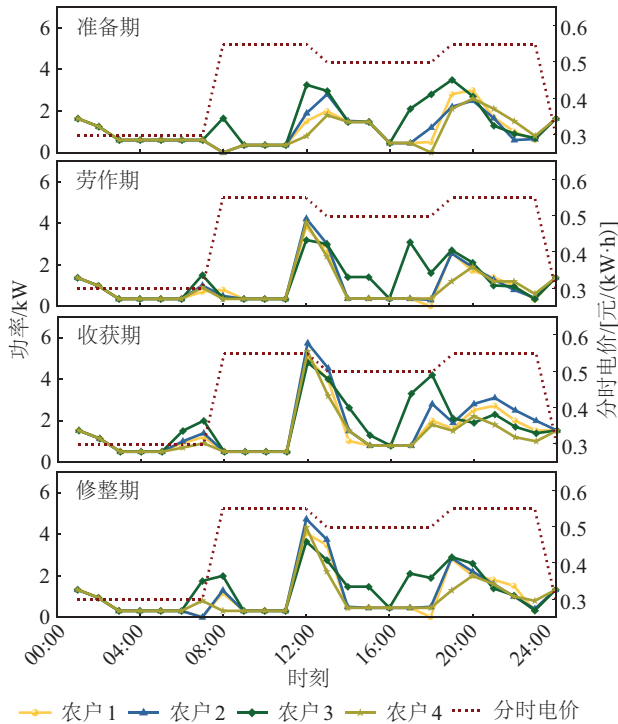


图7 典型农户在不同典型日内的用电负荷

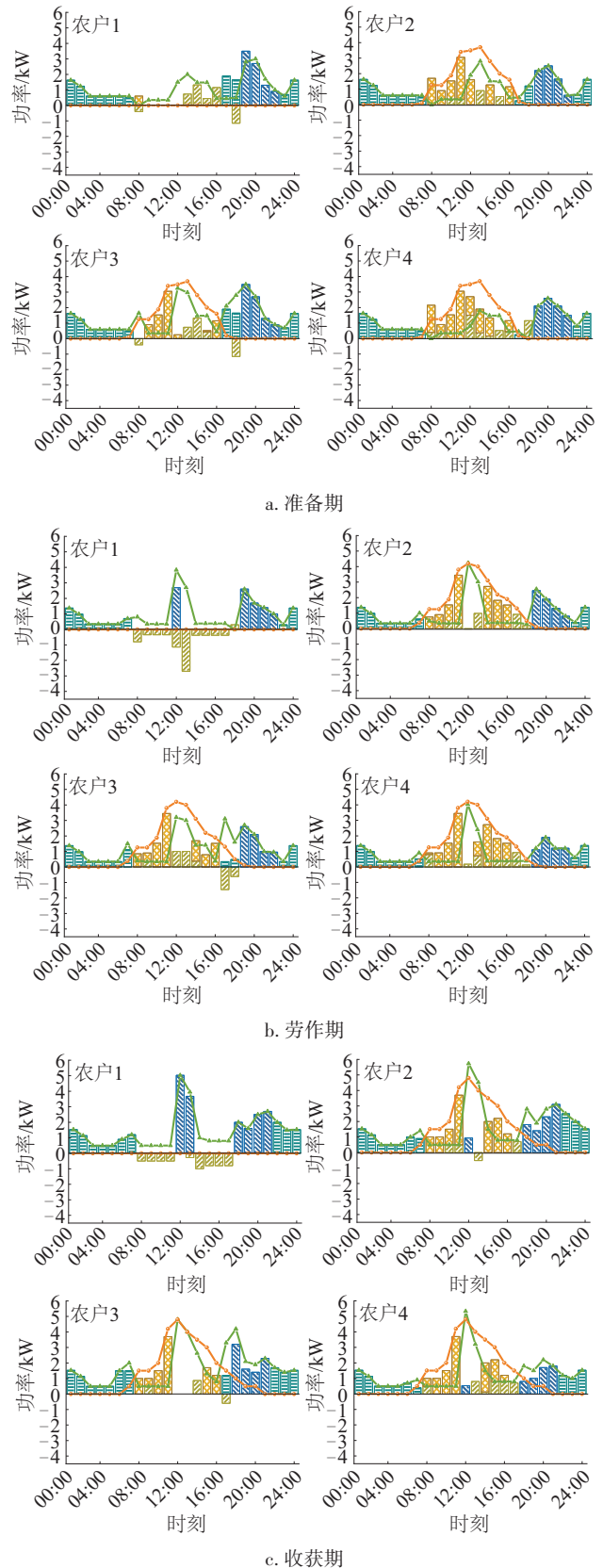
Fig. 7 Electricity load of a typical rural households during different typical days

5.2 计算结果

5.2.1 运行调控

不同典型日内集中-分散式储能双层优化调控结果如图8所示。由图8可看出,在不同典型日内,农户及储能运营商的能源交易行为呈现明显差异。收获期,P2P交易从08:00开始至17:00结束,其他时期交易时间段则延长至18:00,主要由于蓄电型农机设备在收获期被广泛用于农业生产,导致

可用于P2P交易的电量相应较少,而其他时期的蓄电型农机设备利用率较低,剩余可交易电量增多,P2P交易时间得以适当延长。对于储能电站,其充放电策略随典型日特征的



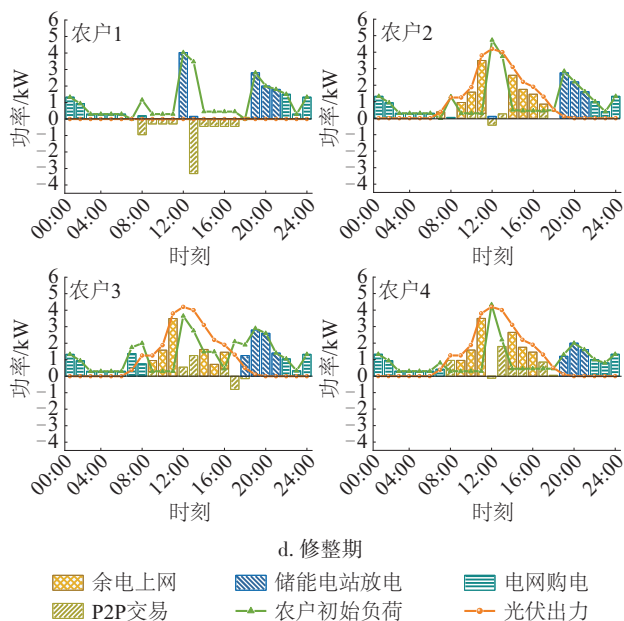


图8 不同典型日各主体购售电策略优化结果

Fig. 8 Optimization results of electricity purchase and sale strategies of different agents during different typical days

变化而动态调整。在劳作期、收获期以及修整期,储能电站在 12:00—13:00 时段集中放电,主要由于这 3 个时期的农业生产和生活用电需求较高且该时段为农户用电高峰期,仅依靠 P2P 交易无法满足用电负荷需求,同时储能电站售电价又小于电网分时电价,因此农户选择从储能电站购电;在准备期,蓄电型农机设备在上午时段的使用频率较低,且分布式光伏在 12:00—13:00 时段出力较高,P2P 交易可满足农户用电高峰期的需求,故该时段农户无需额外向储能电站购电。

从农户角度进一步分析同一农户在不同典型日内的优化调控结果可发现,由于农户 1 未安装屋顶光伏,完全依赖外部供电,因此在所有典型日内的 P2P 交易中始终充当买家,交易最为频繁。相比之下,农户 2 安装屋顶光伏且从事季节性农业生产,在准备期和劳作期蓄电型农机设备使用频率较低,光伏发电量相对充足且用电负荷相对较低,因此在 P2P 交易中主要充当卖家进行售电;在其他时期,蓄电型农机设备的使用频率增加,导致其自身用能需求增加,因此在无法满足农户 2 用能需求时,该农户会在 P2P 交易中转变为买家进行购电。农户 3 在各典型日内的 P2P 交易中既充当卖家又作为买家,在收获期因生产活动导致电力需求上升,自用电量增加,售电量减少;在其他时期,其整体用电需求下降,导致售电量增加。农户 4 在各典型日内因需要外出务工,用电需求相对较低,光伏电量盈余较多,所以在 P2P 交易中主要作为卖家进行售电,但在修整期内由于务工人员返乡,用能需求增加,在用电高峰期时作为买家购电。

5.2.2 经济性分析

不同场景下集中-分散式储能系统中各主体的年运行成

本如图 9 所示。从各农户年用电总成本变化情况来看,相比于场景 1,场景 2 的 P2P 交易使得农户 1~4 的年用电总成本分别降低 3.08%、8.03%、6.52%、91.27%,其中农户 1 的成本降幅最小,主要由于其未安装屋顶光伏,因此在 P2P 交易中始终充当买家购电来满足其用电需求。相比之下,农户 4 因外出务工导致用电需求较低,同时光伏发电盈余较多,因此其成本降幅最大。从储能运营商年总收益变化情况来看,P2P 交易使储能运营商的年总收益降低 7.67%,主要由于下层农户通过 P2P 交易减少对储能电站充放电调度功率的需求,在避免对储能电站频繁调度的同时降低了储能电站通过低储高放带来的收益。因此,P2P 交易对于储能运营商带来了一定的利益损失,削弱了上层储能运营商在市场中的主导地位。

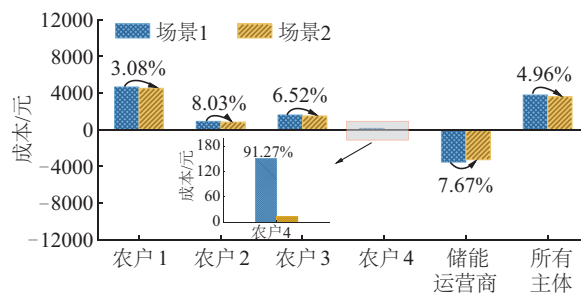


图9 不同场景下各主体年运行成本

Fig. 9 Annual operation costs for different agents under different scenarios

综上,P2P 交易使集中-分散式储能系统中各主体的运行成本降低 4.96%,说明 P2P 交易在优化资源配置、提升能源利用效率方面的潜在优势,同时表明合理的市场机制设计可在平衡各利益相关方收益的基础上促进储能资源的高效配置与利用。

5.2.3 环保性分析

不同场景下集中-分散式储能系统中各主体的年碳排放量如图 10 所示。由图 10 可知,P2P 交易使农户 1~4 以及储能运营商的年碳排放量分别降低 39.45%、11.21%、8.57%、0.76%、0.59%。综合来看,P2P 交易使得集中-分散式储能系统的总碳排放量降低 10.41%,其原因在于 P2P 交易的引入促进了农户间的电力互补,提高了能源利用效率,减少了农户从电网购电的需求,降低了对高碳电力的依赖,从而实现了

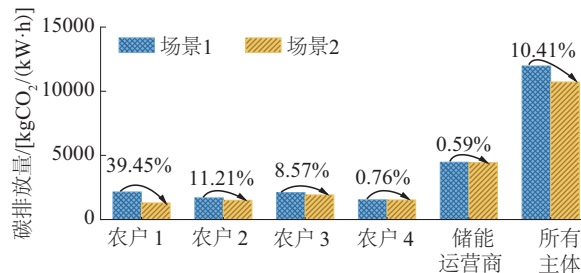


图10 不同场景下各主体年碳排放量

Fig. 10 Annual carbon emissions of different agents under different scenarios

碳排放量的下降。其中,原本对高碳电力依赖最多的农户 1, 其因 P2P 交易而减少的碳排放量幅度也最大。从储能运营商的角度来看,P2P 交易通过优化储能设备的充放电策略,减少了储能电站在高峰时段对电网的依赖,从而进一步降低了整体的碳排放量。

5.2.4 技术性分析

不同场景下集中-分散式储能系统中各主体的光伏消纳情况如图 11 所示。从各农户光伏消纳率变化情况来看,相比于场景 1,场景 2 的 P2P 交易使得农户 2~4 的光伏消纳率分别提升 13.70%、11.31%、31.87%。综合来看,P2P 交易使得集中-分散式储能系统的光伏消纳率提升 18.04%。原因在于 P2P 交易优化了分布式光伏发电的本地消纳途径,使各农户能够更有效地利用自身及邻近农户的光伏资源。其中,农户 4 的光伏消纳率升幅最大,主要由于其用电需求较低且光伏发电盈余多,在 P2P 交易中能够将富余光伏电量出售给其他农户,从而显著提高其光伏自用比例。由于农户 1 未安装屋顶光伏,其在 P2P 交易中始终扮演买方的角色,依赖从其他农户购买光伏电力来满足自身用电需求,因此通过 P2P 交易未能提升其光伏消纳率。

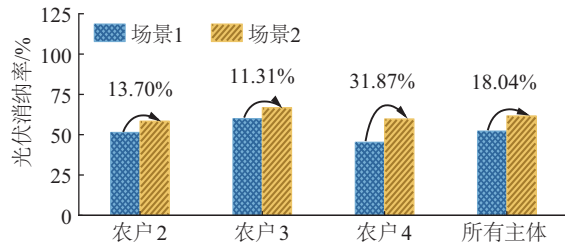


图 11 不同场景下各主体光伏消纳情况

Fig. 11 Photovoltaic consumption situations of different agents under different scenarios

5.3 敏感性分析

不同场景下集中-分散式储能系统中各主体的年运行成本在不同储能容量下的变化规律如图 12 所示。由图 12 可见,在场景 1、2 中,随着分散式储能容量由 0.68 kW·h 依次增至 1.35、2.70、4.05 及 6.08 kW·h,各农户的年运行成本整体呈下降趋势。在场景 2 中,各农户年运行成本相较于前一容量水平的降幅区间分别为:农户 1 4%~25%,农户 2 8%~17%,农户 3 10%~54%,农户 4 3%~94%。这主要是由于分散式储能容量的增加显著提升了农户的能源自给能力,使得农户在光伏发电富余时段能够储存更多电能,从而减少了对电网及储能运营商的购电需求,降低了外部购电成本。此外,在相同储能容量配置下,引入 P2P 交易使得各农户的年运行成本进一步优化,部分农户还获取了一定收益。具体而言,在引入 P2P 交易后,各农户年运行成本的额外降幅区间分别为:农户 1 2%~4%,农户 2 8%~9%,农户 3 4%~54%,农户 4 3%~92%。P2P 交易为具备电能盈余能力的农户提供了电量售出的渠

道,储能容量的增加进一步增强了其交易能力与潜在收益,促使其年运行成本进一步下降。其中,农户 4 的年运行成本降幅最大,而且随着储能容量的增加还获取了一定收益。由于农户 4 较低的负荷需求且主要在 P2P 交易中充当卖家,因此随着自有储能容量的增加,其可通过 P2P 交易实现成本的显著下降与额外收益的获取。

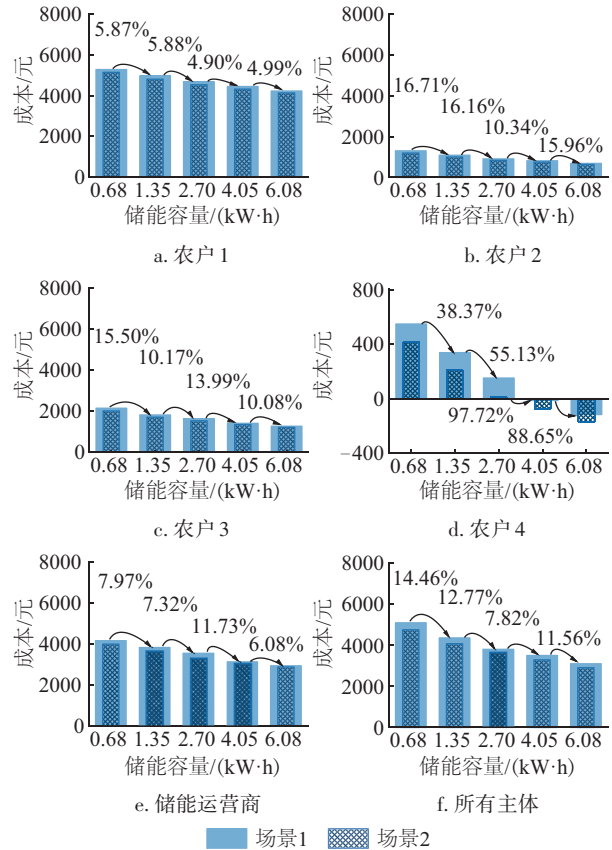


图 12 不同场景下储能容量敏感性分析

Fig. 12 Sensitivity analysis of energy storage capacity in different scenarios

相比之下,储能运营商的年总收益随分散式储能容量的增加而降低,尤其在 P2P 交易引入后,农户间的电能交换进一步弱化了运营商在本地能量协调中的角色,导致其收益水平更进一步降低。具体而言,在场景 2 中,储能运营商的年总收益相较于前一容量水平的降幅区间为 4%~10%。在相同储能容量配置下,P2P 交易使其年总收益额外降幅区间为 3%~8%。这主要是由于随着农户自身储能容量的增加削弱了其对于运营商提供的电力服务依赖程度,从而导致运营商的收益降低。

综合来看,分散式储能系统容量的逐渐增加使集中-分散式储能系统中各主体的年运行成本降低,在场景 2 中,系统年运行成本相较于前一容量水平的降幅区间为 9%~15%。在引入 P2P 交易后,系统年运行成本在相同储能容量配置下进一步优化,额外降幅区间为 4%~7%。上述结果表明,分散式储能容量的合理增加与 P2P 交易机制的协同应用,在提升

农村能源系统的高效利用与经济性方面具有积极的推动作用,可为构建低碳、可持续的农村能源系统提供重要支撑。

6 结 论

本文结合典型农村生产生活用能规律,提出一种基于组合双向拍卖的分散式储能 P2P 交易机制,在交易环境下建立了基于主从博弈的农村集中-分散式储能系统双层优化调控模型,主要研究结论如下:

1)农户通过 P2P 交易可有效降低年用电成本。其中,屋顶光伏装机大、用电需求小、储能资源充足的农户成本降幅尤为突出。储能运营商则会因 P2P 交易而收益受损,但可通过适当收取运营管理费的方式得到补偿。综合来看,P2P 交易使集中-分散式储能系统中各主体的运行成本降低 4.96%。

2)P2P 交易使得集中-分散式储能系统的总碳排放量降低 10.41%。原本对高碳电力依赖越多的农户,其碳排放量降幅越大。

3)P2P 交易使得集中-分散式储能系统的光伏消纳率提升 18.04%。用电需求低且光伏发电盈余多,同时在 P2P 交易中主要作为卖家的农户其光伏消纳率升幅越大。

4)通过敏感性分析发现,分散式储能容量的增加显著降低了农户的年运行成本。相比之下,储能运营商的收益逐渐降低。综合来看,分散式储能容量增加使得集中-分散式储能系统中各主体的年运行成本降低,并且在引入 P2P 交易后,系统年运行成本在相同储能容量配置下进一步得到优化。

本文提出的 P2P 交易市场下考虑农机电池的农村集中-分散式储能系统双层优化调控方案能够兼顾储能运营商与各农户间决策的相互影响,但下层农户主体的数量相对较少,会对农户的能源交易行为模拟结果产生一定影响。后续研究将扩大农户样本规模,以更全面地反映农村地区 P2P 交易市场的实际运行情况。

[参考文献]

- [1] 刘艳峰,杨燕子,罗西. 关中农村不同类型家庭夏季柔性用能负荷多目标优化调度研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 110-118.
LIU Y F, YANG Y Z, LUO X. Multi-objective optimization scheduling model of flexible energy consumption load in summer for different types of rural households in Guanzhong plain[J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(8): 110-118.
- [2] 孙英聪,陈来军,李笑竹,等. 考虑资源相关性的新能源场站群集中式共享储能优化配置[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 2-9.
SUN Y C, CHEN L J, LI X Z, et al. Optimal allocation of centralized shared energy storage for renewable energy station clusters with consideration of resource correlation [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(7): 2-9.
- [3] 闫东翔,陈玥. 共享储能商业模式和定价机制研究综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 178-191.
YAN D X, CHEN Y. Review on business model and pricing mechanism for shared energy storage [J]. Automation of electric power systems, 2022, 46(23): 178-191.
- [4] 朱金龙,王维庆,李笑竹,等. 计及健康状态差异的集中式共享储能分级调控策略[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 172-180.
ZHU J L, WANG W Q, LI X Z, et al. Hierarchical control strategy for centralized shared energy storage considering differences in health status [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(7): 172-180.
- [5] 国家发展改革委,国家能源局. 关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见[EB/OL]. 北京: 国家发展改革委, 2022.
National Development and Reform Commission (2022). Guiding opinions on accelerating the construction of a national unified electricity market system. Available at https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/30/content_5671296.htm.
- [6] 刘娟,邹丹平,陈毓春,等. “互联网+”的客户侧分布式储能 P2P 共享模式运营机制及效益探讨[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(4): 97-105.
LIU J, ZOU D P, CHEN Y C, et al. Discussions on operation mechanism and benefits of customer-side distributed energy storage P2P sharing mode of “Internet+” [J]. Advances of power system & hydroelectric engineering, 2020, 36(4): 97-105.
- [7] TUSHAR W, YUEN C, SAHA T K, et al. Peer-to-peer energy systems for connected communities: a review of recent advances and emerging challenges [J]. Applied energy, 2021, 282: 116131.
- [8] 刘可真,董敏,杨春昊,等. 基于纳什谈判的智能园区 P2P 电能交易优化运行[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(5): 45-53.
LIU K Z, DONG M, YANG C H, et al. Optimal operation of P2P electric power trading in smart park based on Nash negotiation [J]. Electric power automation equipment, 2023, 43(5): 45-53.
- [9] 郭琳,陈先锋,邓惠华,等. 含分布式电源 P2P 交易的社区微网运营机制[J]. 电力建设, 2018, 39(7): 2-9.
GUO L, CHEN X F, DENG H H, et al. A framework of operating mechanism based on peer-to-peer transaction among distributed energy resources in community microgrid [J]. Electric power construction, 2018, 39(7): 2-9.
- [10] 高红均,张凡,刘俊勇,等. 考虑多产消者差异化特征的社区微网系统 P2P 交易机制设计[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1455-1470.
GAO H J, ZHANG F, LIU J Y, et al. Design of P2P

- transaction mechanism considering differentiation characteristics of multiple prosumers in community microgrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1455-1470.
- [11] LUO X, SHI W C, JIANG Y S, et al. Distributed peer-to-peer energy trading based on game theory in a community microgrid considering ownership complexity of distributed energy resources[J]. Journal of cleaner production, 2022, 351: 131573.
- [12] LUO X, SHI W C. Optimal regulation of flexible loads in rural residential buildings considering mobile batteries: a case study in Shaanxi Province[J]. Building simulation, 2024, 17(7): 1065-1083.
- [13] 田欣, 陈来军, 李笑竹, 等. 基于主从博弈和改进 Shapley 值的分布式光伏社区共享储能优化运行策略[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2252-2261.
- TIAN X, CHEN L J, LI X Z, et al. Optimal scheduling for energy storage sharing among communities with photovoltaic resource based on Stackelberg game and improved shapley value [J]. Power system technology, 2023, 47(6): 2252-2261.
- [14] 孙偲, 郑天文, 陈来军, 等. 基于组合双向拍卖的共享储能机制研究[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1732-1739.
- SUN C, ZHENG T W, CHEN L J, et al. Energy storage sharing mechanism based on combinatorial double auction [J]. Power system technology, 2020, 44(5): 1732-1739.
- [15] 殷辉, 陆信辉, 周开乐. 分布式与集中式储能并存的微电网负荷优化调度[J]. 中国管理科学, 2023, 31(2): 118-128.
- YIN H, LU X H, ZHOU K L. Optimal load dispatch for microgrid with distributed and centralized energy storage systems [J]. Chinese journal of management science, 2023, 31(2): 118-128.
- [16] 张桂红, 刘飞, 田旭, 等. 基于用户点对点交易的共享储能协同优化策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(8): 143-151.
- ZHANG G H, LIU F, TIAN X, et al. Collaborative optimization strategy of shared energy storage based on user point-to-point transaction[J]. Southern power system technology, 2023, 17(8): 143-151.
- [17] 杨冬锋, 王铁琳, 杨士慧, 等. 基于混合博弈的多微网-共享储能双层能量交易策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1392-1402.
- YANG D F, WANG Y L, YANG S H, et al. Multi-microgrid and shared energy storage two-layer energy trading strategy based on hybrid game [J]. High voltage engineering, 2024, 50(4): 1392-1402.
- [18] ZHU Z Y, WANG Y, YUAN M, et al. Energy saving and carbon reduction schemes for families with the household PV-BES-EV system [J]. Energy and buildings, 2023, 288: 113007.
- [19] 周楠, 樊玮, 刘念, 等. 基于需求响应的光伏微网储能系统多目标容量优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1709-1716.
- ZHOU N, FAN W, LIU N, et al. Battery storage multi-objective optimization for capacity configuration of PV-based microgrid considering demand response [J]. Power system technology, 2016, 40(6): 1709-1716.
- [20] 陕西省发展和改革委员会价格处. 关于调整陕西电网目录销售电价有关事项的通知[EB/OL]. 西安: 陕西省发展和改革委员会, 2021.
- Shaanxi Provincial Development and Reform Commission (2021). Notice regarding the adjustment of matters related to the catalog sales electricity price of Shaanxi power grid [EB/OL]. https://sndrc.shaanxi.gov.cn/sy/xwxx/gggg/202304/t20230412_3119247.html.
- [21] SHEWALE A, MOKHADE A, FUNDE N, et al. An overview of demand response in smart grid and optimization techniques for efficient residential appliance scheduling problem[J]. Energies, 2020, 13(16): 4266.

DOUBLE-LAYER OPTIMAL CONTROL OF RURAL CENTRALIZED-DISTRIBUTED ENERGY STORAGE SYSTEMS IN P2P TRADING MARKET CONSIDERING AGRICULTURAL MACHINERY BATTERIES

Luo Xi, Han Mingyue, Zheng Yanning, Huang Wenyuan

(*School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China*)

Abstract: Currently, the centralized optimization regulation strategy for conventional energy storage systems struggles to meet the operational requirements of centralized-distributed energy storage systems in rural areas. To address this challenge, this study examines a typical village in the Central Shaanxi Plain, Shaanxi Province, China, and integrates the usage patterns of agricultural machinery batteries into energy storage regulation. A peer-to-peer (P2P) trading mechanism for distributed energy storage, based on a combinatorial double auction, is proposed. In the trading environment, a double-layer optimal regulation model for rural centralized-distributed energy storage systems is established using a Stackelberg game approach and computationally solves it. The results show that 1) P2P trading are highly influenced by agricultural production patterns in both quantity and time. 2) P2P trading reduces the operating cost of each subject in the centralized-distributed energy storage system by 4.96%, reduces carbon emissions by 10.41%, and increases the PV consumption rate by 18.04%. 3) The annual electricity cost of different types of rural households is reduced by the increase of decentralized energy storage capacity, the reduction is more significant after the introduction of P2P trading, and the cost reduction is especially prominent for rural households with large rooftop PV installations, small electricity demand, and sufficient energy storage resources. Energy storage operator will suffer from the increase in revenue due to the increase in decentralized energy storage capacity, and the revenue will be further reduced after the introduction of P2P trading, but can be compensated for by appropriately charging operation and management fees.

Keywords: peer to peer trading; agricultural machinery batteries; distributed energy storage; centralized energy storage; optimal regulation; combinatorial double auction

附录 A

表 A1 电动三轮车偏好使用时间参数设置

Table A1 Parameter settings of preferred use time of electric tricycles

农户类型	$t^{\text{pr,sl}}—t^{\text{pr,et}}$			
	准备期	劳作期	收获期	修整期
种植型	09:00—11:00	09:00—11:00	08:00—11:00	08:00—11:00
		14:00—17:00	14:00—18:00	
养殖型	08:00—09:00	07:00—08:00	06:00—07:00	07:00—08:00
	13:00—14:00	12:00—13:00	12:00—13:00	12:00—13:00
	16:00—17:00	17:00—18:00	18:00—19:00	16:00—18:00
务工型	09:00—11:00	08:00—11:00	07:00—11:00	08:00—11:00
		14:00—18:00	14:00—18:00	14:00—18:00

表 A2 电动三轮车电池充电时间参数设置

Table A2 Parameter settings of battery charging time of electric tricycles

农户类型	$t^{\text{c,sl}}—t^{\text{c,et}}$			
	准备期	劳作期	收获期	修整期
种植型	14:00—15:00	12:00—13:00	12:00—13:00	12:00—13:00
	24:00—次日 02:00	24:00—次日 02:00	24:00—次日 02:00	24:00—次日 02:00
养殖型	14:00—15:00	14:00—15:00	14:00—15:00	14:00—15:00
	24:00—次日 02:00	24:00—次日 02:00	24:00—次日 02:00	24:00—次日 02:00
务工型	14:00—15:00	12:00—13:00	12:00—13:00	12:00—13:00
	24:00—次日 02:00	24:00—次日 02:00	24:00—次日 02:00	24:00—次日 02:00