

面向多类型工业用户的分散式共享储能配置及投资效益分析

刘亚锦,代航,刘志坚,刘瑞光
(昆明理工大学 电力工程学院,云南 昆明 650500)

摘要:针对传统一体化式共享储能存在的灵活性较差且无法兼顾多类型用户的差异性用电需求等问题,提出一种分散式共享储能系统优化配置与调度方法;针对用户通过储能补贴政策漏洞骗取补贴收益的问题,在已出台政府补贴政策的基础上,提出一种改进分时补贴策略。首先,以工业园区为应用背景,深入分析了分散式共享储能系统与多个工业用户的能量交互机理;然后,以多用户整体净收益最大化为目标构建了基于合作博弈的月前、日前两阶段优化调度模型,并采用Shapley值法对合作收益进行分配;接着,设计了以储能全寿命周期净收益、动态投资回收期、投资回报率为指标的储能投资评估方法;最后,通过对比一体化式共享储能和分散式共享储能的配置成本、运行经济性,对所提方法的有效性进行了验证。算例结果表明:所提分散式共享储能配置方法在降低工业用户初期投资成本、用电成本方面具有一定的先进性,所提改进分时补贴策略在防止用户投机骗补方面具有一定的有效性,对推动用户侧储能多元化发展具有理论指导意义。

关键词:分散式共享储能;分时补贴策略;合作博弈;Shapley值法;投资回报率;工业用户;优化配置

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202110004

0 引言

储能对推动能源绿色转型、助力我国早日实现“双碳”目标具有重要的意义^[1-2]。为了加快推动储能领域的发展,国家能源局于2021年4月发布了《关于加快推动新型储能发展的指导意见(征求意见稿)》,文件明确了2025年实现储能规模化转变目标,积极支持用户侧储能多元化发展,并适当拉大峰谷价差,为用户侧储能创造更大的利润空间^[3]。可预测,用户侧储能的商业化应用模式在我国即将迎来快速发展。

然而,目前储能因配置成本较高且使用寿命年限较短,难以在用户侧得到大规模的应用^[4]。特别是在以工业园区为代表的用户侧,通常采用单用户单储能的配置与运行模式,存在储能装置利用率低、用户投资经济效益不理想且投资意愿普遍不高等问题。因此,积极探索用户侧储能的合理配置方法及优化运行模式,是在当前储能高配置成本下提高用户投资经济性、激发用户投资热情的有效方法。

针对工业用户的储能优化配置及调度,文献[5]构建了工业用户的储能配置评估及月前和日前两阶段储能优化调度模型,对不同类型工业用户配置储能的经济性进行了研究;文献[6]对比分析了用户配置不同类型储能电池的经济性,并在日前滚动优化阶段构建了用户月需量值更新模型,以修正负荷预测误差的影响;文献[7]利用层次分析法构建了储能配置评估模型,评估分析了工业、商业、居民3类典

型用户的储能配置经济性。上述文献侧重于研究单用户单储能模式下储能的优化配置、调度及评估等问题。随着“共享经济”理念不断深入人心,多用户共享储能的模式^[8]逐渐受到了众多学者的青睐。

目前已有针对多用户共享储能的研究,文献[9]将共享储能的思想应用于网-荷协同运行场景中,通过对用户实行可变电价,并将用户侧储能与配电网运营商进行共享后,降低了用户的用电成本及电网的改造成本;文献[10-11]从共享储能优化调度的角度,建立了社区光伏产消者间的能量共享模型,通过优化调度共享储能出力,降低了社区全体用户的用电成本;文献[12]从共享储能优化配置的角度,在考虑工业园区光伏出力不确定性的基础上,构建了共享储能优化配置和调度的双层模型。在共享模式下,需要对参与者通过合作获取的合作收益进行合理分配,从而保证合作的长期稳定。文献[13]通过构建基于利益分享的纳什议价模型,对多光伏产消者和社区储能运营商间的合作收益进行了合理分配;文献[14]提出了一种适用于大量参与者的改进核仁收益分配方法,提高了核仁法的计算效率,并对智慧能源社区内多个产消者的合作收益进行了分配;文献[15]建立了多售电公司共享储能的合作博弈模型,并根据各售电公司的贡献度,对购电成本结余收益进行了合理分配。

上述文献未充分考虑不同类型用户的用电行为差异,事实上,以集中一体化工作式配置的共享储能(为了简化表述,将其简称为一体化式共享储能)缺乏灵活性,无法兼顾不同类型用户的用电需求,储能

系统的潜力没有被充分挖掘。如避峰型用户在电价谷时段需要储能放电以削减最大负荷需量,而双峰型用户在电价峰时段需要储能放电以最大限度地削减用电量,但由于一体化式共享储能任意时刻只能处于充电或放电单一状态,在电价谷时段放电将错失充电机会,减少储能在电价峰时段的可放电量,从而降低了收益。而在储能补贴政策方面,上述文献未充分考虑部分用户可能存在利用政策漏洞而投机骗补的行为。

综上所述,本文选取双峰型、平峰型、避峰型 3 类工业用户为研究对象,在考虑资金时间价值的基础上,提出了一种多类型工业用户配置分散式共享储能的优化模型,通过 Shapley 值法将合作获取的联盟收益分配至各用户;同时,提出了一种改进分时补贴策略模型。最后,通过算例仿真验证了所提分散式共享储能的灵活性、优越性,以及所提改进分时补贴策略的有效性。

1 园区分散式共享储能系统的结构

园区分散式共享储能系统主要由工业园区能源代理 IPEA (Industrial Park Energy Agent)、分散式共享储能、不同类型工业用户组成,其系统结构如图 1 所示。其中, IPEA 为园区内各用户提供统一购电、储能调度计划制定、每月购电费用结算出清等服务;分散式共享储能在 IPEA 的调度下为园区内的用户提供电量削减和需量削减服务;各用户均配备了智能电表,可以为 IPEA 实时提供当前的负荷信息。

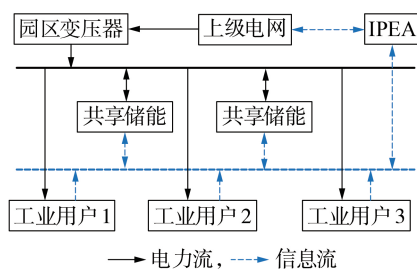


图 1 工业园区分散式共享储能系统结构

Fig.1 Structure of decentralized shared energy storage system in industrial park

在月初, IPEA 通过读取各用户的历史负荷数据,为各用户制定当月的负荷最大需量值,并统一上报给上级电网。

在日前, IPEA 根据上级电网下发的电价信号,在电价平谷时段调度分散式共享储能充电,充电功率由当前负荷量不超过负荷最大需量值的工业用户承担, IPEA 负责记录并将其折算为用户的等效负荷,以便在月末进行电费出清结算。当存在某用户的原始负荷大于其负荷最大需量值时, IPEA 合理协调分散式共享储能,调度一部分共享储能放电供应该用户,以削减峰值负荷使其不超过最大需量值;同

时,另一部分共享储能继续充电,为后续电价峰时段的负荷削减做准备。在电价峰时段, IPEA 以全体用户的用电成本削减最大为目标,调度分散式共享储能放电,并为各用户分配放电功率,以削减全体用户在电价峰时段的用电量,同时控制各用户负荷不超过负荷最大需量值。

在月末, IPEA 根据各用户对园区电费成本削减所做的边际贡献,核算各用户应缴纳的用电成本。

2 分散式共享储能的优化配置模型

2.1 目标函数

用户侧共享储能的优化配置是在计及储能全寿命周期投资成本后,以最大化用户用电成本削减量为目标,即以最大化用户净收益为目标。本文所考虑的储能全寿命周期内的用户收益包括电量电费削减收益、需量电费削减收益、获得的政府补贴收益,储能全寿命周期投资成本包括初始安装成本和运行维护成本。所以,分散式共享储能的优化配置目标函数可表示为:

$$\max F_1 = \sum_{i=1}^N (B_1^i + B_2^i + B_3^i) - C_1 - C_2 \quad (1)$$

式中: F_1 为用户净收益; N 为园区内不同类型工业用户的总数量; B_1^i 、 B_2^i 分别为工业用户 i 的电量电费削减收益、需量电费削减收益; B_3^i 为工业用户 i 获得的政府补贴收益; C_1 、 C_2 分别为储能初始安装成本、运行维护成本。

2.1.1 电量电费削减收益

储能具有改变能量时空分布的特性,基于分时电价,工业用户可在电价低谷时段存储电能,在电价高峰时段释放电能,以降低自身在电价高峰时段的网端等效负荷量,从而减少用电成本。在考虑资金时间价值的基础上,在分散式共享储能全寿命周期内用户的电量电费削减收益可表示为:

$$B_1^i = \sum_{j=1}^T D S_1^i \left(\frac{1+t_r}{1+d_r} \right)^j \quad (2)$$

$$S_1^i = \sum_{t=1}^k \left[\sum_{h=1}^n (-P_{h,dis}^i(t) - P_{h,ch}^i(t)) \right] \Delta t m_1(t) \quad (3)$$

式中: T 为分散式共享储能的全寿命周期; D 为共享储能的年运行天数,去除维护时间,取 $D=345$ d; t_r 为年通货膨胀率; d_r 为贴现率; S_1^i 为工业用户 i 每天的电量电费削减收益; k 为一天的时段数,以 1 h 为时段间隔 (即 $\Delta t=1$ h), 则 $k=24$; n 为园区内分散式共享储能数量; $P_{h,dis}^i(t)$ 为 t 时段共享储能 h 分配给工业用户 i 的放电功率,其值不大于 0; $P_{h,ch}^i(t)$ 为 t 时段共享储能 h 分配给工业用户 i 的充电功率,其值不小于 0; $m_1(t)$ 为 t 时段的分时电价。

2.1.2 需量电费削减收益

目前,面向工业用户的基本电费计费方式主要有2种:一种是按为用户配备的变压器容量计费,另一种是按用户负荷最大需量计费。其中,按用户负荷最大需量计费以价格作为引导,具有鼓励用户自觉提升用电负荷率、降低自身负荷最大需量的作用^[16]。因此,本文根据用户实际负荷最大需量计算用户的基本电费。则在分散式共享储能全寿命周期内用户的需量电费削减收益可表示为:

$$B_2^i = \sum_{j=1}^T MS_2^i \left(\frac{1+t_r}{1+d_r} \right)^j \quad (4)$$

$$S_2^i = (L_{\max}^i - L_{\text{Bmax}}^i) m_b \quad (5)$$

式中: M 为年运行月数,取 $M=12$; S_2^i 为工业用户 i 每月的需量电费削减收益; $L_{\max}^i$ 、 L_{Bmax}^i 分别为工业用户 i 配置储能前、后的负荷最大需量值; m_b 为需量电费价格。

2.1.3 获得的政府补贴收益

目前,我国尚未有明确统一的储能补贴政策。部分地方政府为了扶持当地储能项目的发展,针对本地区的储能项目下发了相应的补贴政策。2019年4月,苏州市工业园区管委会出台了用户侧储能补贴政策,明确指出:对于在园区备案实施并且已并网投运的储能项目,自项目投运后按发电量补贴3 a,补贴价格为0.3元/(kW·h)^[17]。

储能补贴政策的初衷是为了扶持储能投资项目的发展,提升用户投资经济效益,但存在部分用户利用补贴政策漏洞,投机骗取政府补贴的问题。为了积极发挥补贴政策的良性作用,引导储能投资领域的健康发展,本文提出了一种改进分时补贴策略。

以工业用户 i 获取政府补贴为例,具体原理说明如下。首先,比较 t 时段所有共享储能对工业用户 i 的放电总量 $P_{\text{sum,dis}}^i(t)$ 与0的大小:若 $P_{\text{sum,dis}}^i(t)=0$,则表示储能未放电,无需政府补贴;若 $P_{\text{sum,dis}}^i(t)<0$,则需进一步判断 t 时段的分时电价。若为峰时段电价,则属于合理放电操作,应给予正常补贴。若为平谷时段电价,则需要比较 t 时段工业用户 i 的原始负荷 $P_{\text{load}}^i(t)$ 与其申报的负荷最大需量值 L_{Bmax}^i :若 $P_{\text{load}}^i(t) \leq L_{\text{Bmax}}^i$,则表明工业用户 i 在 t 时段没有削减负荷需求的实际需求,放电操作不合理,应给予降额补贴;若 $P_{\text{load}}^i(t) > L_{\text{Bmax}}^i$,则需要实施分段补贴策略,即应对用于负荷需量削减部分的电量给予正常补贴,而对超出负荷需量削减部分的电量进行降额补贴。改进分时补贴策略的实施流程图见附录A图A1。

基于本文所提改进分时补贴策略,分散式共享储能全寿命周期内工业用户 i 获得的政府补贴收益 B_3^i 以及工业用户 i 在 t 时段通过共享储能放电所获得的政府补贴收益 $s_3^i(t)$ 分别如式(6)和式(7)所示。

$$B_3^i = \sum_{j=1}^3 D \left[\sum_{t=1}^k s_3^i(t) \Delta t \left(\frac{1+t_r}{1+d_r} \right)^j \right] \quad (6)$$

$$s_3^i(t) = \begin{cases} -m_g P_{\text{sum,dis}}^i(t) & \text{正常补贴} \\ -m_{g,\text{low}} P_{\text{sum,dis}}^i(t) & \text{降额补贴} \\ m_g P_{\text{cut}}^i(t) + m_{g,\text{low}} (-P_{\text{sum,dis}}^i(t) - P_{\text{cut}}^i(t)) & \text{分段补贴} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_{\text{sum,dis}}^i(t) = \sum_{h=1}^n P_{h,\text{dis}}^i(t) \\ P_{\text{cut}}^i(t) = P_{\text{load}}^i(t) - L_{\text{Bmax}}^i \\ m_{g,\text{low}} = \frac{1-\eta_c \eta_d}{\eta_c \eta_d} m_t(t) \times 0.99 \end{cases} \quad (8)$$

式中: m_g 为政府正常补贴电价; $m_{g,\text{low}}$ 为降额补贴电价,计算公式的详细推导过程见附录B; $P_{\text{cut}}^i(t)$ 为 t 时段工业用户 i 将原始负荷削减至最大需量所需功率; η_c 、 η_d 分别为共享储能的充电、放电效率。

2.1.4 储能初始安装成本

储能初始安装成本 C_1 主要由储能电池的额定容量成本和额定功率成本决定,如式(9)所示。

$$C_1 = C_e \sum_{h=1}^n E_{h,\text{max}} + C_p \sum_{h=1}^n P_{h,\text{max}} \quad (9)$$

式中: C_e 为储能的单位容量成本; $E_{h,\text{max}}$ 为共享储能 h 的额定容量; C_p 为储能的单位功率成本; $P_{h,\text{max}}$ 为共享储能 h 的额定功率。

2.1.5 储能运行维护成本

储能运行维护成本是指为了保障储能系统在全寿命周期内正常运行而动态投入的资金,主要与储能配置的额定功率有关。分散式共享储能全寿命周期内的运行维护成本 C_2 可表示为:

$$C_2 = \sum_{j=1}^T \left(C_m \sum_{h=1}^n P_{h,\text{max}} \right) \left(\frac{1+t_r}{1+d_r} \right)^j \quad (10)$$

式中: C_m 为储能单位功率运行维护成本。

2.2 约束条件

2.2.1 储能功率约束

共享储能装置在某时段的总充电、放电功率应分别等于该时段分配至各工业用户的充电、放电功率之和,如式(11)所示;在任意 t 时段共享储能装置的总充电、放电功率以及分配至各工业用户的充电、放电功率不能超过共享储能装置的额定功率,分别如式(12)和式(13)所示。

$$\begin{cases} P_{h,\text{ch}}(t) = \sum_{i=1}^N P_{h,\text{ch}}^i(t) \\ P_{h,\text{dis}}(t) = \sum_{i=1}^N P_{h,\text{dis}}^i(t) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{h,\text{ch}}(t) \leq P_{h,\text{max}} \\ -P_{h,\text{max}} \leq P_{h,\text{dis}}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{h, \text{ch}}^i(t) \leq P_{h, \text{max}} \\ -P_{h, \text{max}} \leq P_{h, \text{dis}}^i(t) \leq 0 \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (13)$$

式中: $P_{h, \text{ch}}(t)$ 、 $P_{h, \text{dis}}(t)$ 分别为 t 时段共享储能 h 的总充电、放电功率。

2.2.2 储能充放电状态约束

$$B_{h, \text{dis}}(t) + B_{h, \text{ch}}(t) \leq 1 \quad (14)$$

式中: $B_{h, \text{ch}}(t)$ 、 $B_{h, \text{dis}}(t)$ 为 0-1 变量, 分别表示 t 时段共享储能 h 的充电、放电状态, 放电时有 $B_{h, \text{dis}}(t)=1$ 、 $B_{h, \text{ch}}(t)=0$, 充电时有 $B_{h, \text{ch}}(t)=1$ 、 $B_{h, \text{dis}}(t)=0$, 不充不放电时有 $B_{h, \text{ch}}(t)=0$ 、 $B_{h, \text{dis}}(t)=0$ 。

2.2.3 储能荷电状态约束

$$S_{\text{soc}, h, \text{min}} \leq S_{\text{soc}, h}(t) \leq S_{\text{soc}, h, \text{max}} \quad (15)$$

式中: $S_{\text{soc}, h}(t)$ 为 t 时段共享储能 h 的荷电状态; $S_{\text{soc}, h, \text{max}}$ 、 $S_{\text{soc}, h, \text{min}}$ 分别为共享储能 h 的荷电状态上、下限。

2.2.4 储能荷电状态连续性约束

$$S_{\text{soc}, h}(t+1) = S_{\text{soc}, h}(t) + \frac{P_{h, \text{dis}}(t)}{E_{h, \text{max}} \eta_d} \Delta t + \frac{P_{h, \text{ch}}(t) \eta_c}{E_{h, \text{max}}} \Delta t \quad (16)$$

2.2.5 始末荷电状态一致性约束

$$S_{\text{soc}, h}(0) = S_{\text{soc}, h}(24) \quad (17)$$

式中: $S_{\text{soc}, h}(0)$ 、 $S_{\text{soc}, h}(24)$ 分别为共享储能 h 在一天始、末时段的荷电状态。

2.2.6 储能能量倍率系数约束

假设共享储能的额定容量和额定功率成正比, 即:

$$E_{h, \text{max}} = \beta_h P_{h, \text{max}} \quad (18)$$

式中: β_h 为共享储能 h 的能量倍率系数。

2.2.7 等效负荷功率约束

配置共享储能后, 各工业用户的等效负荷功率不可超过其最大需量值, 且各工业用户在 t 时段的等效负荷不得超过未配置共享储能时的最大负荷, 避免形成新的负荷高峰, 同时 t 时段的系统等效负荷不得小于 0, 即不允许储能向电网倒送功率, 如式(19)所示。

$$0 \leq P_{\text{equ}}^i(t) \leq L_{\text{Bmax}}^i \leq L_{\text{max}}^i \quad (19)$$

$$P_{\text{equ}}^i(t) = P_{\text{load}}^i(t) + \sum_{h=1}^n (P_{h, \text{dis}}^i(t) + P_{h, \text{ch}}^i(t)) \quad (20)$$

式中: $P_{\text{equ}}^i(t)$ 为 t 时段工业用户 i 的网端等效负荷。

2.3 评估指标

对共享储能进行优化配置后, 需对配置结果的优劣进行评估, 常用的评估指标包括储能配置的经济效益、投资回收期、投资回报率等。本文中共享储能的配置目标为最大化用户净收益, 因此将用户净收益作为主要评估指标, 将投资回收期和投资回报率作为辅助评估指标。

2.3.1 动态投资回收期

动态投资回收期是指在考虑资金时间价值的条件下, 投资项目从初期开始累积每年的净现金流量至能抵偿全部投资所需要的时间。本文计及资金的时间价值, 考虑储能获取 3 a 补贴, 且在每年年初支付储能运行维护成本, 则有:

$$\sum_{j=1}^{N_t} (C_{\text{cl}, j} - C_{\text{co}, j}) \left(\frac{1+t_r}{1+d_r} \right)^j - C_1 = 0 \quad (21)$$

$$C_{\text{cl}, j} - C_{\text{co}, j} = \begin{cases} \sum_{i=1}^N [D(S_1^i + S_3^i) + MS_2^i] - C_m \sum_{h=1}^n P_{h, \text{max}} & N_t \leq 3 \\ \sum_{i=1}^N (DS_1^i + MS_2^i) - C_m \sum_{h=1}^n P_{h, \text{max}} & N_t > 3 \end{cases} \quad (22)$$

$$S_3^i = \sum_{t=1}^k s_3^i(t) \quad (23)$$

式中: N_t 为动态投资回收期; $C_{\text{cl}, j}$ 为第 j 年的现金流入量, 包含电量电费削减收益、需量电费削减收益、政府补贴收益, $C_{\text{co}, j}$ 为第 j 年的现金流出量, 即储能运行维护成本, $C_{\text{cl}, j} - C_{\text{co}, j}$ 为第 j 年的净现金流量; S_3^i 为工业用户 i 在一天内通过共享储能放电所获取的政府补贴收益。

2.3.2 投资回报率

$$R = \frac{F_1}{C_1 + C_2} \times 100\% \quad (24)$$

式中: R 为投资回报率。

3 分散式共享储能的两阶段优化调度及收益分配模型

3.1 月前阶段各工业用户的最大需量优化模型

在月前优化阶段, IPEA 基于第 2 节储能优化配置模型所得额定容量和额定功率, 结合月前负荷预测数据, 以工业园区内各类工业用户在该月内的总用电成本削减最大为目标, 优化共享储能分配至各用户的充放电功率, 从而预测得到各用户在该月内的最优月需量值。目标函数可表示为:

$$\max F_2 = \sum_{i=1}^N [(S_1^i + S_3^i) D_M + S_2^i] \quad (25)$$

式中: F_2 为所有用户在本月内的用电成本削减收益; D_M 为本月的天数, 取值为 30 d。约束条件与第 2 节中优化配置模型的约束条件类似, 不同之处在于共享储能 h 的额定容量 $E_{h, \text{max}}$ 和额定功率 $P_{h, \text{max}}$ 为已知值。

3.2 日前阶段储能优化调度模型

在日前优化调度阶段, IPEA 结合日前负荷预测数据, 以所有用户在一天内的用电成本削减最大为目标, 优化共享储能在各时段分配至各用户的充放电功率。目标函数可表示为:

$$\max F_3 = \sum_{i=1}^N (S_1^i + S_3^i) \quad (26)$$

式中: F_3 为所有用户在一天的用电成本削减收益。约束条件与第 2 节中优化配置模型的约束条件类似, 不同之处在于共享储能 h 的额定容量 $E_{h, \max}$ 、额定功率 $P_{h, \max}$ 以及各用户的最大月需量值 $L_{B \max}^i$ 为已知值。

3.3 基于 Shapley 值法的收益分配模型

在合作博弈中, 某些原本独立的个体为了共同的利益主动相互联合形成联盟, 以集体利益最大为目标, 相互协调一致的行动^[18]。达成联盟后, 保证联盟长期稳定合作的关键是如何公平合理地将联盟收益分配至联盟内各成员, 常用的分配方法有 Shapley 值法、核心值、核仁值法等^[19]。其中, Shapley 值法根据联盟内各成员对联盟做出的边际贡献, 将收益合理分配至各成员。对于由 n 个工业用户组成的总联盟 n_n 而言, 采用 Shapley 值法进行收益分配, 可得用户 i 的分配收益 x_i 为:

$$x_i = \sum_{Q \subset n_n - \{i\}} \frac{|Q|!(|n_n| - |Q| - 1)!}{|n_n|!} (v(Q \cup \{i\}) - v(Q)) \quad (27)$$

式中: v 为总收益; $\{i\}$ 为用户 i 独立形成的个体联盟; Q 为总联盟 n_n 排除用户 i 后的任意子联盟; $|Q|$ 为子联盟 Q 内的用户数量; $|n_n|$ 为总联盟 n_n 内的用户数量。收益分配需满足分配前、后联盟总收益不变, 即:

$$\sum_{i=1}^n x_i = v(n_n) \quad (28)$$

式(28)可验证 Shapley 值法分配收益的正确性。

3.4 储能优化配置模型及两阶段优化调度模型求解

在 MATLAB 仿真软件中搭建储能优化配置及两阶段优化调度模型, 采用 CPLEX 12.10.0 求解器进行求解。优化求解流程图如图 2 所示, 具体步骤说明见附录 C。

4 算例分析

4.1 参数设置

本文考虑某工业园区包含 3 个不同类型的工业用户, 分别为双峰型工业用户 1、平峰型工业用户 2、避峰型工业用户 3。各类工业用户的负荷曲线及工业电价如附录 D 图 D1 所示, 其中, 工业分时电价及双峰型工业用户 1 的负荷取自文献[6], 平峰型工业用户 2 和避峰型工业用户 3 的负荷是在文献[20]的基础上修改得到。分时电价的峰时段为 08:00—11:00 和 17:00—20:00, 谷时段为 01:00—07:00, 其余时段为平时段, 峰、平、谷时段的电价分别为 1.069 7、0.641 8、0.325 1 元/(kW·h)。最大需量计费价格为 40 元/(kW·月); 计及资金的时间价值, 年通货膨胀率取值为 2%, 贴现率为 8%; 政府补贴电价为 0.3

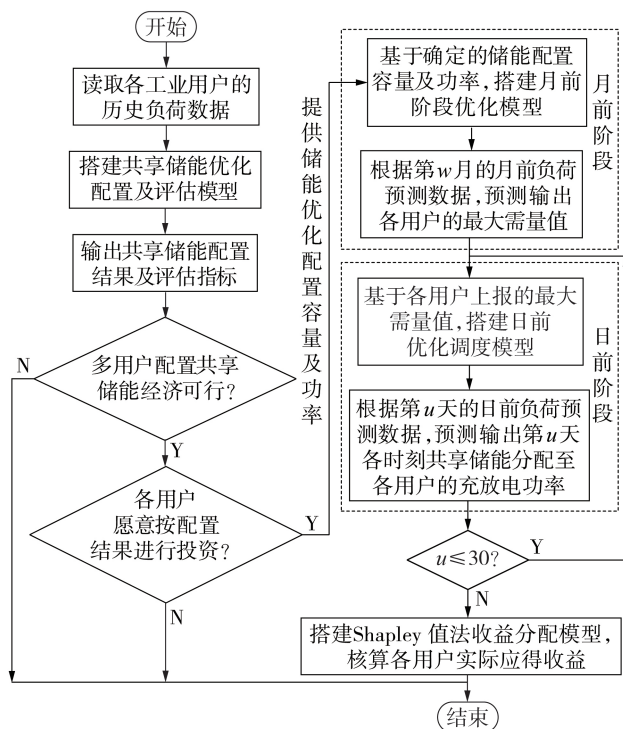


图 2 共享储能优化配置及两阶段优化调度模型的求解流程图

Fig.2 Flowchart of solving optimal configuration and two stage optimal scheduling models of shared energy storage

元/(kW·h), 补贴时长为储能投运后 3 a; 储能电池类型选取为锂电池, 单位容量成本为 1 600 元/(kW·h), 单位功率成本为 600 元/kW, 充电、放电效率均为 90%, 设计寿命为 10 a, 荷电状态上、下限分别为 100%、20%, 初始荷电状态为 20%。

4.2 分散式和一体化式共享储能配置结果对比分析

为了体现配置分散式共享储能的优越性, 本文设置 2 种不同的配置模式进行对比, 分别为一体化式配置模式、分散式配置模式。在一体化式配置模式下, 各用户以总收益最大为目标, 合作配置 1 台共享储能装置; 而在分散式配置模式下, 各用户以总收益最大为目标, 合作配置 2 台在同一时刻既可独立运行又可协作运行的共享储能装置 (分储 X 和分储 Y)。2 种配置模式的优化结果如表 1 所示。

表 1 2 种配置模式的优化结果

Table 1 Optimization results of two configuration modes

配置模式	配置容量 / (kW·h)	配置功率 / kW	F_1 / 万元	N_1 / a	R / %
一体化式	28 303.23	5 284.55	991.74	7.43	18.19
分散式	22 648.57(X), 2 937.10(Y)	4 076.74(X), 652.69(Y)	1 031.80	7.18	20.97

分析表 1 可知, 2 种配置模式下不同类型工业用户可通过合作配置获取净收益, 在储能全寿命

周期内回收其投资成本。在分散式配置模式下,2台共享储能装置的配置容量差异较大,总配置容量为25 585.67 kW·h,相较于一体化式配置容量约降低了9.6%,总配置功率为4729.43 kW,相较于一体化式配置功率约降低了10.5%。可见,分散式配置模式不仅降低了用户的初期投资门槛,也降低了后期的储能运行维护成本。在投资者最关注的净收益方面,分散式配置模式的净收益相较于一体化式配置模式约增加了4.04%,产生了更多的经济效益。此外,分散式配置模式的动态投资回收期略有缩短,且投资回报率约提高了2.78%。分散式配置模式下联盟净收益提升原因的具体分析见4.3节和4.4节。

4.3 一体化式共享储能的调度结果分析

一体化式共享储能对各用户的功率分配结果如图3所示,2种储能配置模式下各用户的等效负荷如图4所示。

分析图3可知:在除02:00时刻外的01:00—07:00电价谷时段内,储能充电为后续高峰时段的负荷削减做准备,充电功率主要由负荷功率较小的双峰型用户1和平峰型用户2承担,功率分配较为随机;而在02:00的电价低谷时刻,结合图4(c)可知,储能为了最大化联盟收益,选择少量放电以削减避峰型用户3的高峰负荷,减少其负荷最大需量。在08:00—11:00的电价峰时段,结合图3、4可知:避峰型用户3的负荷功率较低,储能对其放电只能获得电量电费削减收益,因此分配所得放电功率较低;而双峰型用户1的负荷功率较高,对其放电可同时获得电量电费削减收益和需量电费削减收益,因此分配所得放电功率最多。虽然平峰型用户2在该时段的负荷功率也较大,但储能只选择在10:00对其少量放电,主要原因在于用户2在负荷峰时段的波动较小,持续时间覆盖了电价峰平时段08:00—16:00,若选择最大化削减其负荷,受到最大需量的影响,储能的放电过程将持续整个08:00—16:00的电价峰平时段,由于电量持续减少,无法为后续的电价峰时段提供更多负荷削减服务,导致用电成本削减降低;而选

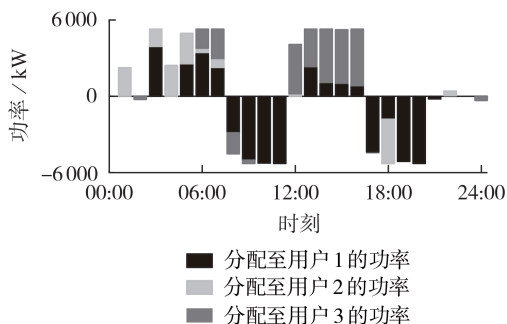
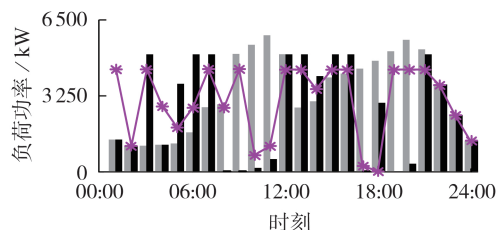
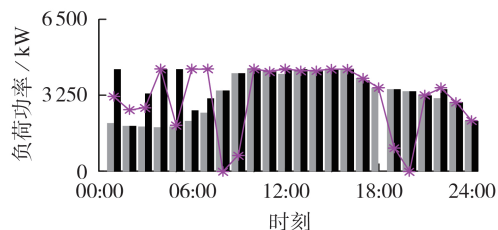


图3 一体化式共享储能对各用户的功率分配结果

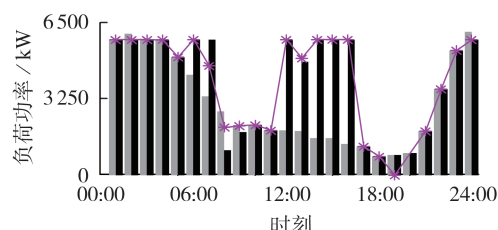
Fig.3 Power distribution results of integrated shared energy storage to each user



(a) 双峰型用户1



(b) 平峰型用户2



(c) 避峰型用户3

■ 用户原始负荷
■ 一体化式储能配置模式下用户等效负荷
* 分散式储能配置模式下用户等效负荷

图4 2种配置模式下各用户的等效负荷

Fig.4 Equivalent load of users under two configuration modes

择对用户1多放电即可在08:00—11:00的电价峰时段最大限度削减用电量,同时最大限度地削减其负荷需量,之后在12:00—16:00的电价平时段继续充电,为后续电价峰时段用户1的高峰负荷削减做准备,获取更多的用电成本削减收益。

在12:00—16:00的电价平时段,由图3可知,储能分配至用户3的充电功率最多,而分配至用户1和用户2的充电功率依次减少,原因在于用户3的负荷功率较低,可承担最多的充电负荷,而用户1和用户2的负荷较高,受负荷最大需量的影响,只可承担较少的充电负荷。在后续的17:00—20:00电价峰时段,储能对各用户的功率分配情况与08:00—11:00时段类似。

仅根据上述分析,仍无法判断分散式配置模式下联盟净收益提升的原因。为此,还需要结合分散式共享储能的调度结果进行深入分析。

4.4 分散式共享储能调度结果分析

分储X和分储Y对各用户的功率分配结果如图5所示。对比图3和图5可知,在电价平时段的12:00时刻,配置容量较小的分储Y选择对用户1进行放电,而配置容量较大的分储X以及一体化式共享储

能均选择充电。再结合图4(a)可知:由于分储Y选择对用户1放电,使其在该时刻的负荷最大需量减小,而分储X选择全力充电,为后续电价峰时段所有用户的负荷削减做准备;反观一体化式共享储能,为了削减后续电价峰时段全体用户用电量以最大化联盟收益,只能选择放弃该时刻对用户1的放电机会,导致总体用电成本削减收益降低。

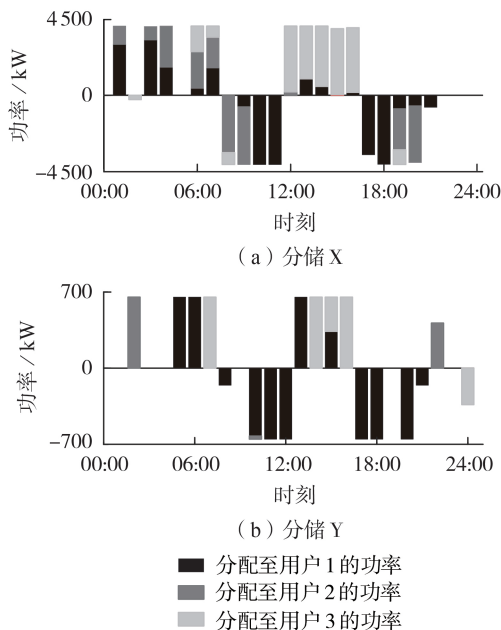


图5 分散式储能对各用户的功率分配结果

Fig.5 Power distribution results of decentralized energy storage to each user

此外,结合图4、5可知,分储X、Y配置容量差异较大的原因在于二者的主要职能不同。其中,配置容量较大的分储X主要负责在多数电价平谷时段充电,为后续电价及负荷峰时段用户1的电量削减做准备;并兼具在少数时段对部分用户的负荷最大需量削减任务,如02:00、21:00时刻。相反地,配置容量较小的分储Y主要负责在电价平谷时段的某些时刻放电,如12:00、21:00、24:00,以削减用户1和用户3的负荷最大需量,并兼具在电价及负荷峰时段的电量削减任务。

综上所述,在分散式共享储能配置模式下,因为分储X、Y既可独立运行又可协作运行,提升了整个共享储能系统的灵活性,进一步挖掘了共享储能系统的潜力,联盟净收益得以进一步提升。

4.5 基于Shapley值法的收益分配结果

基于Shapley值法的联盟收益分配结果如表2

表3 2种情景下的储能配置结果及用户收益

Table 3 Configuration results of energy storage and users' profit under two scenes

情景	配置容量/(kW·h)	配置功率/kW	电量电费削减收益/万元	需量电费削减收益/万元	政府补贴收益/万元
1	28 303.23	5 284.55	4 800	420	1 260
2	28 303.23	5 284.55	4 880	420	1 150

所示。由表可知,相比于一体化式配置模式,分散式配置模式下各用户分配得到的净收益均有所提升。其中,用户1—3的净收益分别约提升了0.73%、9.86%、6.12%,各用户净收益提升效果显著。根据式(28),联盟收益分配前、后的总收益不变,验证了该分配结果的正确性。

表2 2种配置模式下基于Shapley值法的收益分配结果

Table 2 Allocation results of profit based on Shapley value method under two configuration modes

配置模式	分配所得净收益/万元		
	用户1	用户2	用户3
一体化式	449.30	95.25	447.19
分散式	452.58	104.64	474.58
净收益提升率/%	0.73	9.86	6.12

4.6 政府补贴修正前、后仿真结果对比

为了体现本文所提改进分时补贴策略对阻止部分用户投机骗补的优越性,本节以一体化式共享储能为配置模式,设置2种情景进行对比分析:情景1以当地政府颁布的储能补贴电价进行直接补贴;情景2在地方政府颁布的储能补贴电价的基础上,采用2.1.3节所提改进分时补贴策略对其进行修正。

2种情景下的储能配置结果及用户收益如表3所示。情景1下储能功率分配结果见附录D图D2,各用户等效负荷见附录D图D3。情景2下储能功率分配结果及各用户等效负荷分别见图3和图4。

分析表3可知,情景1、2的储能配置容量和功率相同,但在全寿命周期内,情景1可获得的总收益多于情景2,虽然电量电费削减收益比情景2约减少了80万元,但政府补贴收益约增多了110万元。结合附录D图D2和图D3(c)可知,在电价谷时段的02:00时刻,共享储能对用户3进行放电,虽然用户3在该时刻有负荷需量削减需求,但储能放电量显然远远超出其需求值。多放出的电量既不可能为用户带来电量电费削减收益,也不可能为用户带来需量电费削减收益,同时由于储能存在充放电效率,用户还需要承担一部分亏损。因此,该部分放电量只可能是用户利用补贴漏洞,通过投机行为放电骗取政府补贴收益。

对比图3和附录D图D2可知,在采用本文所提改进分时补贴策略后,储能在02:00时刻对用户3的放电量不再超过其需量削减需求值,成功阻止了用户利用政策漏洞进行投机骗补的行为。

5 结论

本文针对工业园区内多个不同类型的工业用户,提出一种多用户共享储能的分散式配置模型及调度模型,改进了传统一体化式配置模式下储能系统灵活性不足的问题,提升了共享储能系统的整体效率,为用户创造了更多的收益。通过算例仿真可得以下结论:

1)与一体化式配置模式相比,分散式配置模式不仅为用户带来了更多的经济效益,还减少了共享储能所需配置容量和功率,降低了初期投资门槛;

2)分散式共享储能系统借由2台在同一时刻既可独立运行又可协作运行的共享储能装置,提升了整个系统的灵活性,挖掘了共享储能系统的潜能,可进一步提升多用户配置共享储能的经济性;

3)采用Shapley值法对联盟收益进行分配,各用户均可公平享受结盟后的超额收益,联盟稳定性得以保证;

4)采用本文所提改进分时补贴策略对原有补贴策略进行修正,可在一定程度上有效阻止部分用户利用政策漏洞进行骗补的行为。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 孙国强,袁智,许晓慧,等.碳排放约束下虚拟电厂鲁棒优化竞标模型[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):97-103.
SUN Guoqiang, YUAN Zhi, XU Xiaohui, et al. Bidding model based on robust optimization for virtual power plant under carbon emission constraint[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 97-103.
- [2] 梅天华,汤优敏,甘德强.基于求偿权的电力碳排放权选举分配机制[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):148-153.
MEI Tianhua, TANG Youmin, GAN Deqiang. Voting allocation mechanism of power carbon emission allowance based on claim[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 148-153.
- [3] 国家能源局. 关于加快推动新型储能发展的指导意见(征求意见稿)[EB/OL]. (2021-04-21)[2021-05-12]. http://www.nea.gov.cn/2021-04/21/c_139896047.htm.
- [4] 张国荣,陈夏冉. 能源互联网未来发展综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):1-7.
ZHANG Guorong, CHEN Xiaran. Future development of energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 1-7.
- [5] 陈丽娟,吴甜恬,柳惠波,等. 基于需量管理的两阶段大用户储能优化模型[J]. 电力系统自动化,2019,43(1):194-200.
CHEN Lijuan, WU Tiantian, LIU Huibo, et al. Demand management based two-stage optimal storage model for large users[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 194-200.
- [6] 赵乙潼,王慧芳,何奔腾,等. 面向用户侧的电池储能配置与运行优化策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(6):121-128.
ZHAO Yitong, WANG Huifang, HE Benteng, et al. Optimization strategy of configuration and operation for user-side battery energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(6): 121-128.
- [7] 郭久亿,刘洋,郭焱林,等. 不同典型用户侧储能配置评估与运行优化模型[J]. 电网技术,2020,44(11):4245-4253.
GUO Jiuyi, LIU Yang, GUO Yanlin, et al. Configuration evaluation and operation optimization model of energy storage in different typical user-side[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4245-4253.
- [8] HUANG W X, ABU QAHOUC J A. Energy sharing control scheme for state-of-charge balancing of distributed battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 2764-2776.
- [9] WANG Z M, GU C H, LI F R. Flexible operation of shared energy storage at households to facilitate PV penetration[J]. Renewable Energy, 2018, 116: 438-446.
- [10] YE G Q, LI G X, WU D, et al. Towards cost minimization with renewable energy sharing in cooperative residential communities[J]. IEEE Access, 2017, 5: 11688-11699.
- [11] ZHU H L, OUAHADA K. Credit-based distributed real-time energy storage sharing management[J]. IEEE Access, 2019, 7: 185821-185838.
- [12] 潘倩华,林健全,孙伟卿. 考虑多主体电力负荷不确定性的工业园区共享储能配置与运行策略[J]. 软件,2020,41(7):260-263,296.
PAN Qianhua, LIN Jianquan, SUN Weiqing. Configuration and operation strategy of shared energy storage considering multi-body power load uncertainty in industrial parks[J]. Computer Engineering & Software, 2020, 41(7): 260-263, 296.
- [13] CUI S C, WANG Y W, SHI Y, et al. Community energy cooperation with the presence of cheating behaviors[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 561-573.
- [14] 冯昌森,沈佳静,赵崇娟,等. 基于合作博弈的智慧能源社区协同运行策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(4):85-93.
FENG Changsen, SHEN Jiajing, ZHAO Chongjuan, et al. Cooperative game-based coordinated operation strategy of smart energy community[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 85-93.
- [15] 刘继春,陈雪,向月. 考虑共享模式的市场机制下售电公司储能优化配置及投资效益分析[J]. 电网技术,2020,44(5):1740-1749.
LIU Jichun, CHEN Xue, XIANG Yue. Optimal sizing and investment benefit analysis for energy storage of electricity retailers under market mechanisms considering shared mode[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1740-1749.
- [16] 杨博惟. 高速铁路牵引变电所经济运行方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
YANG Bowei. The research of economical operation method for high speed railway traction substation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [17] 苏州工业园区企业发展服务中心. 苏州工业园区绿色发展专项引导资金管理办法[EB/OL]. (2019-04-29)[2021-05-12]. http://sme.sipac.gov.cn:9006/epservice/techsub/Apps/psp/index.php?s=/Home/PolicySearch/policydetail/id/110284/query_value1/政策检索.
- [18] 史宏超. 基于合作博弈的风火能源外送及利益分配机制研究[D]. 西安:西安理工大学,2019.
SHI Hongchao. Research on wind-thermai energy delivery and benefit distribution mechanism based on cooperative game[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [19] 刘蓉晖,赵增凯,孙改平,等. 考虑不同风险偏好的虚拟电厂优化策略及利润分配[J]. 电力自动化设备,2021,41(4):154-161.
LIU Ronghui, ZHAO Zengkai, SUN Gaiping, et al. Optimiza-

tion strategy and profit allocation of virtual power plant considering different risk preference[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 154-161.

- [20] 侯佳萱, 林振智, 杨莉, 等. 面向需求侧主动响应的工商业用户电力套餐优化设计[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 11-19.
HOU Jiaxuan, LIN Zhenzhi, YANG Li, et al. Design of electricity plans for industrial and commercial customers oriented to active demand response on power demand side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 11-19.

作者简介:

刘亚锦(1985—), 女, 河北保定人, 讲师, 博士, 主要研



刘亚锦

248400248@qq.com)。

究方向为电力设备故障诊断和状态评估(E-mail: liu_yajin@163.com);

代航(1996—), 男, 云南曲靖人, 硕士研究生, 主要研究方向为用户侧储能优化配置及调度(E-mail: daihang132@foxmail.com);

刘志坚(1975—), 男, 山东临朐人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电力系统稳定与控制(E-mail:

(编辑 陆丹)

Configuration and investment benefit analysis of decentralized shared energy storage for multiple types of industrial users

LIU Yajin, DAI Hang, LIU Zhijian, LIU Ruiguang

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming at the problems of traditional integrated shared energy storage system, such as poor flexibility and unable to take into account the different electricity demand of multiple types of users, an optimal configuration and scheduling method of decentralized shared energy storage system is proposed. Aiming at the problem that users cheat the benefits of energy storage subsidy through the loopholes of subsidy policy, an improved time-sharing subsidy strategy is proposed on the basis of the existing government subsidy policy. Firstly, the energy interaction mechanism between the distributed shared energy storage system and multiple industrial users is analyzed in depth with the application background of industrial park. Then, a cooperative game-based month-ahead and day-ahead two-stage optimization scheduling model is constructed to maximize the overall net profit of multiple users, and the cooperative profit is distributed by Shapley value method. Furthermore, the energy storage investment evaluation method is designed, which takes the life cycle net profit, the dynamic investment payback period and the rate of return on investment of energy storage as the indexes. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by comparing the configuration cost and operation economy of the integrated shared energy storage and the distributed shared energy storage. The numerical results show that the proposed configuration method of distributed shared energy storage is advanced in reducing the initial investment cost and electricity cost of industrial users, and the proposed improved time-sharing subsidy strategy is effective in preventing users from speculation and fraud. It has theoretical guiding significance for promoting the diversified development of user-side energy storage.

Key words: decentralized shared energy storage; time-sharing subsidy strategy; cooperative game; Shapley value method; rate of return on investment; industrial users; optimal configuration

附录 A

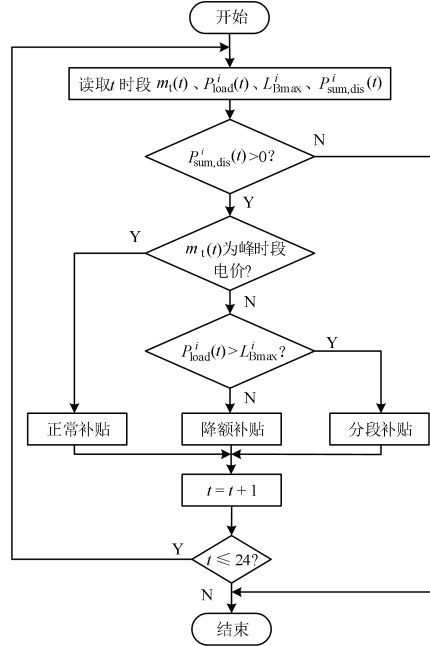


图 A1 分时补贴策略流程图

Fig.A1 Flowchart of time-sharing subsidy strategy

附录 B

降额补贴电价的设定是为了消除用户在平或谷时段通过频繁充放电的投机行为骗取政府补贴的可能性。其基本思想为：考虑到储能存在充放电效率问题，并设定降额补贴电价，使用户在某时刻通过放电获取的收益不足以抵消用户在早期时刻对储能充电所支付的成本，具体公式推导过程如下。

假设有 a 、 t 这 2 个时刻点，其中 a 时刻在 t 时刻之前。现有储能对用户在 t 时刻的放电量为已知值 $P_{\text{dis}}(t)\Delta t$ ，与该放电量对应的，储能在 a 时刻所需消耗充电量为 $P_{\text{ch}}(a)\Delta t$ ，考虑储能放电效率为 η_d ，充电效率为 η_c ，二者关系可表示为：

$$P_{\text{ch}}(a)\Delta t\eta_c\eta_d = P_{\text{dis}}(t)\Delta t \quad (\text{B1})$$

现假设 a 、 t 时刻均属于平时段或谷时段，分时电价均为 $m_t(t)$ ，降额补贴电价为 $m_{g,\text{low}}$ ，可得 a 时刻充电成本 C 和 t 时刻放电收益 S 为：

$$\begin{cases} C = P_{\text{ch}}(a)\Delta t m_t(t) \\ S = P_{\text{dis}}(t)\Delta t m_t(t) + P_{\text{dis}}(t)\Delta t m_{g,\text{low}} \end{cases} \quad (\text{B2})$$

令 $C > S$ ，并联立式 (B1) 和式 (B2) 可推导得到：

$$m_{g,\text{low}} < \frac{1 - \eta_c\eta_d}{\eta_c\eta_d} m_t(t) \quad (\text{B3})$$

由式 (B3) 可知，当降额补贴电价小于 $\frac{1 - \eta_c\eta_d}{\eta_c\eta_d} m_t(t)$ 时，用户在同一平、谷时段通过频繁充放电骗取政府补贴收益的利润空间将被消除。为了将投机者拒之门外，并保障合法用户最大限度获取政府补贴收益（如实际中，在一天的调度末尾时刻，由于始末荷电状态一致性约束迫使其不得不放电），补贴电价只需设定得略小于右式即可，如可取为 $\frac{1 - \eta_c\eta_d}{\eta_c\eta_d} m_t(t)$ 的 99%，即：

$$m_{g,\text{low}} = \frac{1 - \eta_c\eta_d}{\eta_c\eta_d} m_t(t) \times 99\% \quad (\text{B4})$$

附录 C

步骤 1: 确定有意向参与共享储能项目的用户, 分析各用户的历史负荷数据, 并提取各用户的年平均负荷曲线。

步骤 2: 搭建储能优化配置及评估指标模型, 优化求解储能最优配置容量及功率, 并计算各项评估指标。以储能全寿命周期内全体用户净收益最大为主要评估指标, 判断多用户配置共享储能的经济可行性, 并为各用户提供相应配置建议。

步骤 3: 若经济可行, 且各用户接受此配置结果, 则在日后的储能运行优化阶段, 按此配置容量和功率进行优化。

步骤 4: 在每月初, 根据各用户的月前负荷预测数据, 搭建月前优化模型, 优化求解各用户在当月所需申报的最大需量值。

步骤 5: 将当月各用户的最大需量值作为约束, 根据各用户的日前负荷预测数据, 搭建日前优化模型, 优化求解共享储能分配至各用户的充放电出力, 以此循环求解 30 d。

步骤 6: 在每月末, 根据各用户在当月内为全体用户电费成本削减做出的边际贡献, 搭建 Shapley 值法收益分配模型, 核算各用户实际应得收益。次月依次循环步骤四至六。

附录 D

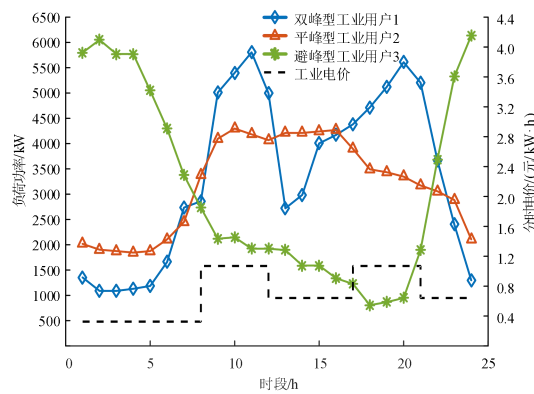


图 D1 负荷曲线及电价曲线

Fig.D1 Load curve and electricity price curve

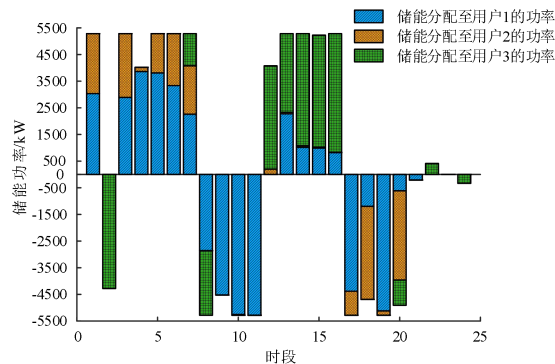
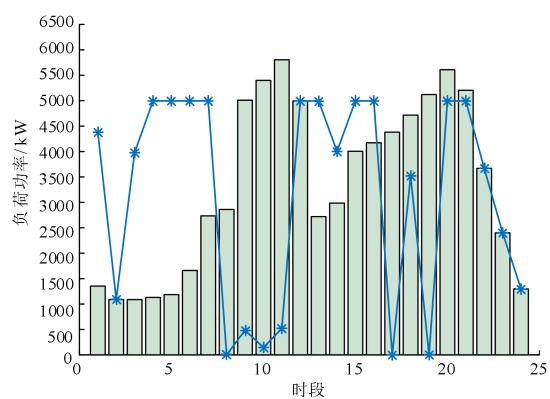
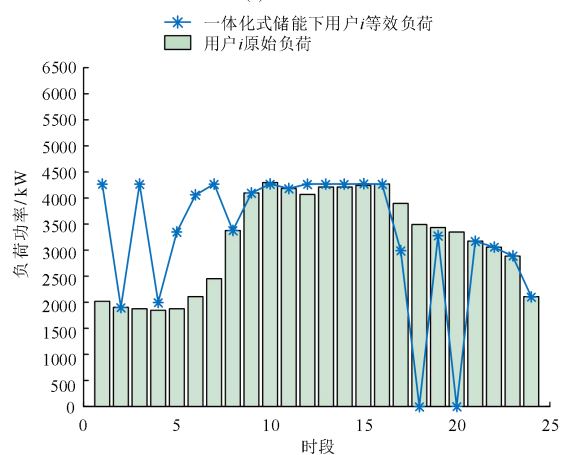


图 D2 情景 1 下一体化式共享储能的功率分配结果

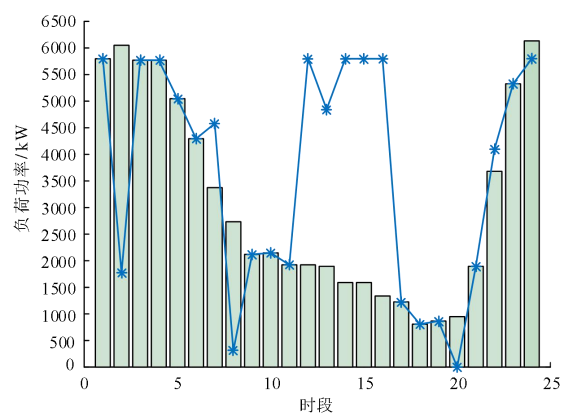
Fig.D2 Power distribution results of integrated shared energy storage under Scenario 1



(a)双峰型用户1



(b)平峰型用户2



(c)错峰型用户3

图 D3 情景 1 下用户的等效负荷

Fig.D3 Equivalent load of users under Scenario 1