

考虑准线型需求响应的共享储能优化配置

尹翔¹, 李建林², 张效俊¹, 刘岩¹, 程石¹

(1. 国网新疆电力有限公司, 乌鲁木齐 830047; 2. 北方工业大学, 北京 100084)

摘要: 随着新能源并网比例的提高, 负荷侧储能及其用户的主要目标是实现整体利益最大化。基于储能利用率低、使用成本高的现状, 负荷的可控性和储能配置的合理性是目前需要考虑的两个关键点。为此, 提出一种基于负荷准线的大规模需求响应实现策略, 以充分发挥负荷侧的需求响应能力。文中提出的负荷准线给出了全时段需求响应调节目标, 以解决负荷可控性不足的问题, 建立了基于社会福利最大化的共享储能配置模型, 以提高储能的利用率和经济性, 提出一种基于 VCG (vickrey-clarke-groves) 机制的成本分配策略, 以达到全局最优效果并实现所提模型的可持续性。仿真结果表明, 在共享储能的参与下, 达到了社会福利最优。此外, 通过 VCG 机制进行成本分摊, 储能的投资回报周期缩短了 33.33%, 提高了投资积极性。

关键词: 需求响应; 负荷准线; 共享储能; 容量优化; VCG 机制

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2026.09.013

中图分类号: TM933

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2026)09-0132-12

Optimal configuration of shared energy storage considering alignment demand response

Yin Xiang¹, Li Jianlin², Zhang Xiaojun¹, Liu Yan¹, Cheng Shi¹

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830047, China.

2. North China University of Technology, Beijing 100084, China)

Abstract: With the rising penetration rate of grid-connected renewable energy, the primary objective of load-side energy storage and its users is to maximize the overall benefits. Based on the low utilization rate and high cost of energy storage, the controllability of load and the rationality of energy storage configuration are two key points to be considered at present. Therefore, a large-scale demand response implementation strategy based on load alignment is proposed to give full play to the demand response ability of the load side. The load alignment proposed in this paper gives the full-time demand response adjustment target to solve the problem of load controllability. A shared energy storage configuration model based on social welfare maximization is established to improve the utilization rate and economy of energy storage. A cost allocation strategy based on Vickrey-Clarke-Groves (VCG) is proposed to achieve the global optimal effect and realize the sustainability of the proposed model. The simulation results demonstrate that with the participation of shared energy storage, the optimal social welfare is achieved. In addition, cost sharing is achieved through the VCG mechanism, and the investment return period of energy storage is shortened by 33.33%, which improves investment enthusiasm.

Keywords: demand response, load alignment, shared energy storage, capacity optimization, VCG mechanism

0 引言

能源在经济和社会发展中发挥着重要作用, 被认为是促进碳达峰和碳中和的主要来源^[1]。随着分布式能源和多种负荷的发展, 可再生能源间歇性发电和可控负荷的激增, 如何充分利用这些可再生

能源并协调和匹配用户侧的灵活负荷成为现研究面临的一大挑战^[2]。利用需求响应计划激发灵活负荷的潜力以提高运行技术和经济性是目前的研究热点之一^[3]。

目前存在两种需求响应的激励方式, 其中价格型需求响应是一种用户非自愿的调节方式, 以分时电碳耦合定价为核心的虚拟电厂主从博弈决策模

基金项目: 国网新疆电力有限公司项目(SGXJ0000FCJS2400288); 北京市自然科学基金资助项目(L242008)

型,各用户主体为追随者并以运行成本最小为优化目标,响应上层的分时电碳耦合价格^[4-5]。文献[6]在建立碳排放量与光伏发电量数值关系的前提下,引入了折扣因子的概念,使产消者通过积极参与需求响应在不同时段以获得更低的折扣价格;文献[7]通过线性回归设计了一种可分配电价的动态定价方案,使微网负荷用户的利润最大化。但上述方法对刚性负荷和决策能力弱的用户友好程度不佳,不利于吸引海量用户参与,只能应用于小规模系统中^[8]。激励型需求响应主要采用用户未参加需求响应时的负荷数据与用户实际负荷曲线相比较,从而评价用户参与需求响应的贡献。例如:文献[9]考虑需求响应的并网型光储微电网储能系统容量优化配置问题,建立基于负荷调度优先级的负荷引导机制,进而提出考虑需求响应引导的储能规划配置策略。文献[10]提出了一种通过社会福利最大化框架为基于激励的需求响应计划定价激励支付的方法,该方法确保了所有参与者的利益。但上述方法致使调度中心需要为每位用户计算各自的负荷基线,其通信、计算的巨大压力^[11],因此亟需研究需求响应大规模、规范性发挥作用的激励方法。

需求响应虽提高了能源管理的灵活性^[12],但其行为难以预测,加剧了需求侧用能的供需不匹配特性^[13],共享储能应对多使用者需求的经营机制不仅具有储能提升负荷用电可靠性和经济性的优势,还能够盘活系统内有限灵活性资源的调度空间,提高资源利用率的同时提高系统可靠性。凭借上述优点共享储能得到了广泛的研究,例如:文献[14]基于共享储能提出了一种台区多元负荷协同控制策略,用户侧根据共享储能价格和分时电价,结合自身需求进行负荷日内调度优化,台区侧通过调整共享储能价格和用户柔性负荷进行协同调度。文献[15]研究了住宅共享储能单元点对点市场模型中供需流的均衡状态,提出了一种服务定价和负荷调度方法。文献[16]为解决用户侧新能源合理配储问题上,提出了储能应用场景缩减方法。文献[17]引入电转气与碳捕获系统耦合设备,综合考虑了阶梯式碳交易和碳封存成本,建立了含氢储能的综合能源系统低碳调度模型。但共享运营需要公平高

效的资源分配机制来平衡多主体的利益,有效的利益分配手段是更加经济化配置储能系统的必要方式^[18]。在电力市场环境下,储能系统的投建以及运维成本、储能用户的用能成本等真实信息并不会轻易对外公开,由此导致了市场成员间的信息不对称性^[19]。而在机制设计理论中,VCG(vickrey-clark-groves)机制是一种激励市场成员披露真实信息的机制设计方法^[20]。文献[21]提出负荷日前市场出清电价机制,该电价机制满足激励相容、个体理性以及日前市场出清社会福利最大化的要求。文献[22]基于 VCG 机制设计理论,提出了一种激励兼容的电-气互联系统市场能源定价机制。上述方法能够引导市场成员上报真实信息并实现对每个市场成员支付的公平分配。

综合上述分析,在新型电力系统的建设目标下本文为促进灵活性资源的协同运营,提出一种基于负荷准线的大规模需求响应实现策略,以充分发挥负荷侧的需求响应能力。主要技术贡献如下:

1) 基于多类型储能用户的用能的时空互补特性,提出用户侧共享储能运营模式的基本框架,以实现经济供能、高效用电;

2) 提出了基于性能激励机制的准线形成方式以及激励补贴策略,充分挖掘微电网用户与共享储能共同价值,简化引导用户改变功耗模式的难度。以弥补刚性负荷和决策能力弱的用户友好程度不佳,不利于吸引海量用户参与的局限;

3) 构建了以共享储能运营商与储能使用者剩余之和最大化的社会福利最佳为目标的用户侧共享储能配置模型,该模型考虑规划与运行两个环节,运行环节按照各市场成员对其他市场成员的替代效益进行定价,满足社会福利最大化、激励相容以及个体理性等性质。

最后,以区域内投建集中式共享储能与 3 个自配新能源发电设备的储能用户为例,对所提配置策略进行算例验证,并对价格、负荷类型、分配方案等因素对配置结果的影响进行定量分析。

1 用户侧共享储能运营模式

用户侧集中式共享储能运营模式框架如图 1 所示,包括用户与共享储能运营商两种类型的运营主体。

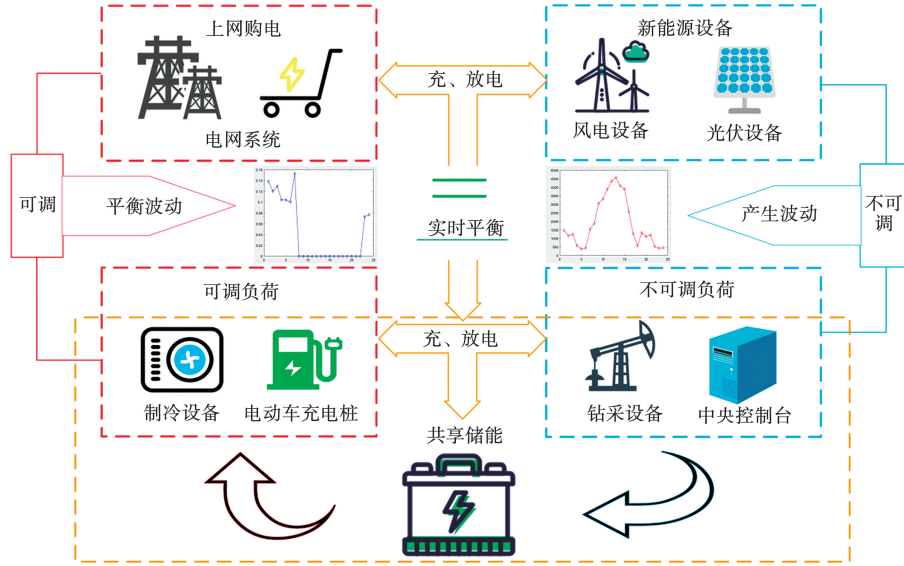


图 1 用户侧共享储能运营框架图

Fig. 1 Operational framework diagram of user-side shared energy storage

各运营主体内部能量供应关系如下：

1) 用户：通过配备的风光发电、向共享储能购电以及向电网购电满足电能需求；通过自身负荷消纳、向共享储能出售盈余电能实现电能消纳；

2) 共享储能：充电，向电网购电、向用户购买盈余风光发电；放电，向用户售电提供电能服务。

2 激励性负荷准线形成

计及调频激励措施中的按响应性能补偿政策^[23]，由区域电网根据实际负荷曲线与负荷准线的跟踪精度，对表现优异的参与者给予阶梯式奖励。

设基准激励价格为 p_m ，取参考文献^[24]的价格优化结果，定义 i 用户参与准线型需求响应后的收益表示为：

$$I_{CDL,i} = p_m \cdot P_D \cdot \varepsilon_i \quad (1)$$

式中： P_D 为用户日前申报的总可调电量； ε_i 为相似度指标用来描述用户实际负荷形态与调节目标的相似度，具体计算如下：

$$\varepsilon_i = \begin{cases} 1 - d_i, & \varepsilon_i \geq \varepsilon_0 \\ 0, & \varepsilon_i < \varepsilon_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$d_i = \sqrt{\sum_{t=1}^T (E_{D,i}^t - E_{CDL}^t)^2} \quad (3)$$

式中： d_i 描述了用户 i 实际负荷线与负荷准线的欧氏距离； ε_0 为划分是否获得需求响应奖励的相似度标准值； $E_{D,i}^t = P_{C,i}^t / P_D^i$ 代表用户 i 柔性负荷的实际

负荷形态； $P_{C,i}^t$ 表示 i 用户在 t 时段的不可调负荷； P_D^i 为第 i 用户日前申报的总可调电量。 E_{CDL}^t 为标幺化后的负荷准线形状，具体计算如下：

$$\begin{cases} E_{CDL}^t = P_{CDL}^t / P_D \\ P_D = \sum_{i=1}^n P_D^i \end{cases} \quad (4)$$

式中： P_{CDL}^t 为 t 时刻的负荷总量；此外负荷准线还存在如下约束：

$$P_G^t - E_{CDL}^t \cdot \sum_{i=1}^n P_D^i = P_G^t - P_R^t \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T E_{CDL}^t = 1 \\ 0 \leq E_{CDL}^t \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} P_R^t \leq P_{R,max}^t \\ P_G^t \leq P_{G,max}^t \end{cases} \quad (7)$$

其中，式(5)中的节点功率平衡约束摒弃了传统的供需平衡等式约束形式，转而采用“可调”平衡“不可调”的新型表达方式，其中 P_G^t 为购电电量， P_R^t 为 t 时段新能源的实际出力。式(6)着重指出，负荷准线旨在调整原有负荷的形态，而非增加或减少总体用电量；式(7)对用户上网购电量以及新能源出力上限进行了约束，其中 $P_{R,max}^t$ 为 t 时段系统内风光的发电量预测值， $P_{G,max}^t$ 为购电电量最大值。

考虑到定义的相似度 ε_i 为分段函数，所以如若

相似度未达到设定的阈值,最终问题将转化为线性规划问题;一旦相似度达到或超过阈值,则需引入变量 C 进行进一步分析:

$$C = p_m P_D d_i = p_m P_D \|E'_{D,i} - E'_{CDL}\|_2 \quad (8)$$

式中: d 转化为二范数的形式表示。使用新变量 C 替换式(1)中目标函数的相应项,并将式(8)转化为不等式形式,作为约束条件加入,从而得到优化问题的新表述:

$$\begin{cases} I_{CDL,i} = p_m P_D - C \\ C \geq p_m P_D \|E'_{D,i} - E'_{CDL}\|_2 \end{cases} \quad (9)$$

3 基于社会福利最大化的共享储能配置模型

共享储能配置考虑到投资与运营两个环节的经济性,分别由用户的收益与共享储能的成本组成,总目标函数为社会福利最大:

$$W_{all} = \max(I_{user} - C_{ses}) \quad (10)$$

式中:以用户收益(I_{user})与共享储能成本(C_{ses})的差值最大化对应社会福利(W_{all})最优。

3.1 用户收益模型

作为所提社会模型中的用户主体,其目标函数为:

$$\begin{cases} I_{user} = \sum_{i=1}^n (I_{CDL,i} + I_{ba,i} + I_{bg,i} + I_{ab,i}) \\ I_{ba,i} = \sum_{t=1}^T \lambda_{ab1} (P'_{bl,i} - P'_{ab1,i}) \\ I_{bg,i} = \sum_{t=1}^T \lambda_g^t (P'_{b2,i} - P'_{g,i}) \\ I_{ab,i} = \sum_{t=1}^T \lambda_{ab2} P'_{ab2,i} \end{cases} \quad (11)$$

式中:用户总收益分别由各用户的需求响应收益、减少的弃电惩罚成本、减少的向电网购电成本以及向共享储能出售弃电的收益组成。其中, λ_{ab1} 为弃电惩罚费用; $P'_{bl,i}$ 和 $P'_{ab1,i}$ 分别表示第 i 个用户在 t 时段无储能下的弃电量和有储能下的弃电量; $P'_{b2,i}$ 和 $P'_{g,i}$ 分别表示第 i 个用户在 t 时段无储能下的购电量和有储能下的购电量; λ_{ab2} 为弃电售出的电价, $P'_{ab2,i}$ 为第 i 个用户在 t 时段出售的弃电量(充进共享储能的电量)。

在用户协同运行方面,具有避免同时弃电和从电网购电、功率平衡、新能源功率使用范围、充放电功率范围、避免同时充放电和只能从电网购电约束,约束条件如下所示:

$$\begin{cases} P'_{bl,i} = (P'_{load,i} - P'_{Rf,i}) U'_{bl,i} \\ P'_{b2,i} = (P'_{load,i} - P'_{Rf,i}) U'_{b2,i} \end{cases} \quad (12)$$

$$U'_{bl,i} = \begin{cases} 0, & P'_{load,i} \geq P'_{Rf,i} \\ 1, & P'_{load,i} < P'_{Rf,i} \end{cases} \quad (13)$$

$$U'_{b2,i} = \begin{cases} 1, & P'_{load,i} > P'_{Rf,i} \\ 0, & P'_{load,i} \leq P'_{Rf,i} \end{cases} \quad (14)$$

$$U'_{bl,i} + U'_{b2,i} \leq 1 \quad (15)$$

$$\begin{cases} P'_{R,i} + P'_{g,i} + P'_{user_ch,i} - P'_{user_dis,i} - P'_{load,i} = 0 \\ 0 \leq P'_{R,i} \leq P'_{R,i} \\ 0 \leq P'_{user_dis,i} \leq P'_{user,i} U'_{dis,i} \\ 0 \leq P'_{user_ch,i} \leq P'_{user,i} U'_{ch,i} \\ U'_{dis,i} + U'_{ch,i} \leq 1 \\ P'_{g,i} \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P'_{load,i}$ 和 $P'_{Rf,i}$ 分别为第 i 个用户在 t 时段的负荷量和配备的新能源出力; $U'_{bl,i}$ 和 $U'_{b2,i}$ 分别表征用户弃电和购电的状态位,为布尔变量,需求大于供给则用户需要购电,反之弃电; $P'_{user_ch,i}$ 和 $P'_{user_dis,i}$ 分别表示第 i 个用户在 t 时段的充电量与放电量; $P'_{R,i}$ 为第 i 个用户在 t 时段所配备的新能源出力上限。约束式(17)包括平衡约束、新能源输出约束、避免用户同时充电和放电的约束以及购买电力的约束。 $P'_{user,i}$ 为第 i 个用户的最大充放电功率; $U'_{ch,i}$ 和 $U'_{dis,i}$ 分别表征用户充电和放电的状态位,为 0-1 变量。

3.2 共享储能成本模型

作为所提社会模型中的共享储能主体,其目标函数为:

$$\begin{cases} C_{ses} = C_{ess,ab} + C_{ess,g} + C_{ess,om} \\ C_{ess,ab} = \sum_{t=1}^T \lambda_{ab2} P'_{ab2} \\ C_{ess,g} = \sum_{t=1}^T \lambda_g^t P'_{ess,g} \\ C_{ess,om} = \sum_{t=1}^T N_{om} (P'_{ess,dis} + P'_{ess,ch}) \end{cases} \quad (17)$$

式中:共享储能总成本分别由从用户购入弃电的成本(用户充电)、向电网购电的成本以及运维成本组成。其中, $P'_{ess,g}$ 为共享储能在 t 时段从电网购入的电量; N_{om} 为共享储能日运行维护费率; $P'_{ess,ch}$ 和 $P'_{ess,dis}$ 分别表示共享储能在 t 时段的充电量与放电量。

在用户与共享储能电站协同运行过程中,需确保的常规约束条件具体如式(18)所述:

$$\begin{cases} P_{\text{ess,CH}}^t = P_{\text{ess,ch}}^t + P_{\text{ess,g}}^t \\ 0 \leq P_{\text{ess,dis}}^t \leq P_{\text{ess}}^{\max} U_{\text{ess,dis}}^t \\ 0 \leq P_{\text{ess,CH}}^t \leq P_{\text{ess}}^{\max} U_{\text{ess,ch}}^t \\ U_{\text{ess,dis}}^t + U_{\text{ess,ch}}^t \leq 1 \\ E_{\text{ess}}^t = E_{\text{ess}}^{t-1} + \eta P_{\text{ess,CH}}^t - P_{\text{ess,dis}}^t / \eta \\ E_{\text{ess}}^{\min} \leq E_{\text{ess}}^t \leq E_{\text{ess}}^{\max} \\ E_{\text{ess}}^0 = E_{\text{ess}}^T \\ P_{\text{ess,g}}^t \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中:分别包含了功率平衡约束、限制充放电功率上下限约束、防止同时充放电约束等。 $P_{\text{ess,CH}}^t$ 表示包含共享储能从用户端充电和向电网购电的总充电量; $P_{\text{ess}}^{\max}$ 为共享储能的最大充放电功率; $U_{\text{ess,ch}}^t$ 和 $U_{\text{ess,dis}}^t$ 分别表示共享储能充电和放电的状态位; E_{ess}^t 为共享储能在 t 时段的容量状态; η 为共享储能的充放电效率; $E_{\text{ess}}^{\max}$ 和 $E_{\text{ess}}^{\min}$ 分别表示共享储能的容量上下限。

4 基于 VCG 的资源分配机制

在运营过程中为鼓励共享储能投建者上报其真实的运维成本,同时激励使用储能充放电服务的用户如实上报其用能收。提出了一种基于 VCG 的资源分配机制。

4.1 基于 VCG 机制的利益分配一阶段

市场成员的价值体现在对其他成员的替代效益和对系统整体效益的贡献上。共享储能的价值表现为参与市场前后市场总社会福利的变动量;同样,某一用户负荷的价值也通过其参与市场前后市场总社会福利的变化来衡量。

令 $\tilde{W}_{\text{all}}$ 为所有成员参与系统市场时的社会福利, $-\tilde{W}_{\text{ess}}$ 为不算共享储能系统的新市场的社会福利。共享储能所获得支付的表达式为:

$$v_{\text{ess}}^{\text{VCG}} = -\tilde{W}_{\text{ess}} - (-\tilde{W}_{\text{all}} - C_{\text{ess}}) \quad (19)$$

令 $\tilde{W}_{-i}$ 为不包含用户负荷 i 的新系统市场的社会福利。则在本文提出的 VCG 机制下, i 用户所获得的支付为:

$$v_i^{\text{VCG}} = \tilde{W}_{-i} - (\tilde{W}_{\text{all}} - I_i) \quad (20)$$

4.2 基于 VCG 机制的利益分配二阶段

不仅需要考虑共享储能和用户的运行成本与

收入来计算初始收益,还要计算共享储能电站的初始投资成本。因此,需引入收益再分配因子对初始成本进行再分配,从而得到用户和共享储能的最终收益,其表达式具体如下:

$$\begin{cases} v_{\text{f-ess}}^{\text{VCG}} = v_{\text{ess}}^{\text{VCG}} + \sum_{i=1}^n [(1-\beta)v_i^{\text{VCG}}] \\ v_{\text{f-i}}^{\text{VCG}} = \beta v_i^{\text{VCG}} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $v_{\text{f-ess}}^{\text{VCG}}$ 为共享储能系统的收益; $v_{\text{f-i}}^{\text{VCG}}$ 为 i 用户的支付; β 为收益再分配因子。

5 算例分析

5.1 算例介绍

微网系统的迅速发展使得用户侧出现了分布式的发电资源,为促使用户消纳更多的新能源,引入共享储能系统来配合用户可控负荷协同运行。为验证所提配置策略及利益分配模型的有效性,选取同一区域内的3个工业用户以及1个共享储能进行算例分析。算例系统参数如表1所示,各工业用户内风光出力、总负荷以及不可调负荷分别如图2、图3所示,一天内电网侧分时电价见表2,算例参数参考文献[25]。

表1 基本参数表

Tab. 1 Table of basic parameters

参数	数值	参数	数值
$P_{G,\max}^t/\text{kW}$	2 000	$\lambda_{\text{ab1}}/(\text{元} \cdot (\text{kW})^{-1})$	0.5
$p_m/(\text{元} \cdot (\text{kW})^{-1})$	1.59	$\lambda_{\text{ab2}}/(\text{元} \cdot (\text{kW})^{-1})$	$0.9\lambda_g^t$
$\varepsilon_0/\%$	70	$N_{\text{om}}\text{元}/((\text{kWh})^{-1})$	50
$\eta/\%$	95	$\beta_p/(\text{元} \cdot (\text{kWh})^{-1})$	380
$\beta_e/(\text{元} \cdot (\text{kWh})^{-1})$	970		

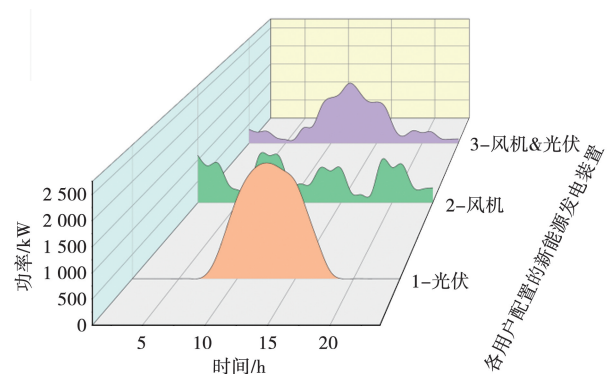


图2 各工业用户内风光出力

Fig. 2 Internal wind power of each industrial user

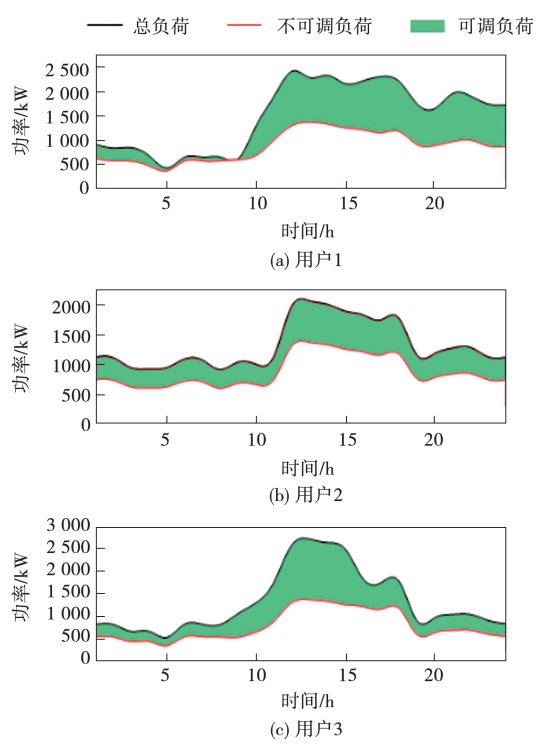


图 3 各工业用户负荷曲线
Fig. 3 Load curve of each industrial user

表 2 电网侧分时电价

Tab. 2 Time-of-use tariff on grid side

峰谷时段	时段	购电价/(元·(kWh) ⁻¹)
峰	10:00 – 16:00	1.33
	18:00 – 22:00	
平	08:00 – 10:00	0.81
	16:00 – 18:00	
	22:00 – 23:00	
谷	23:00 – 次日 08:00	0.40

5.2 结果分析

5.2.1 储能配置结果分析

如图 4 所示,在全用户共同参与需求响应并且使用共享储能的情况下,其社会福利达到了日 41 297.71 元,最终优化的容量大小为 3 400 kWh。

5.2.2 准线型需求响应策略

微网运营商根据可调负荷信息与新能源预测出力发布负荷准线。用户在接收到负荷准线后,会主动调整用电模式,力求提高与负荷准线的相似度指标,从而获取更多的激励效益。将本文所提准线型需求响应与基线型进行对比。

如图 5(a) ~ (c) 中,第 1 个曲线图为区域内微

网系统公布负荷准线后,各用户参与准线型(CDL)需求响应前后的负荷曲线对比情况;第 2 个曲线图为用户根据自身弹性负荷系数参与基线型(CBL)需求响应前后的曲线对比情况;第 3 个曲线图为各用户参与两种需求响应后,且归一化处理后的负荷曲线形状与微网系统公布的负荷准线对比情况。由此可见,本文所提出的准线型需求响应,使得用户负荷发生了明显的变化。相比于基线型需求响应,准线型需求响应实现了对负荷准线更好的跟踪,且负荷整形效果更加明显。

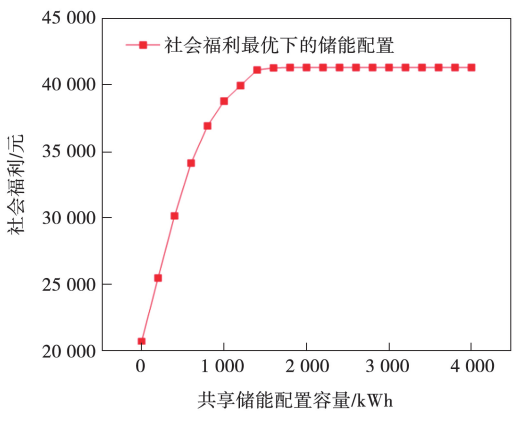
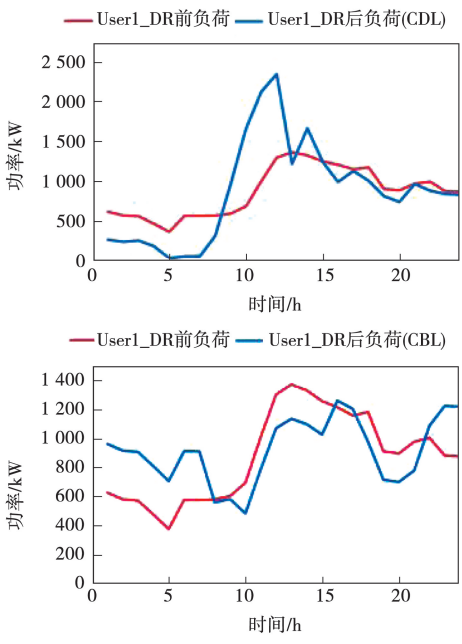


图 4 各工业用户参与准线型需求响应下的
储能最优配置容量曲线
Fig. 4 Capacity curve of optimal allocation of of energy
storage under alignment demand response
participation of various industrial users



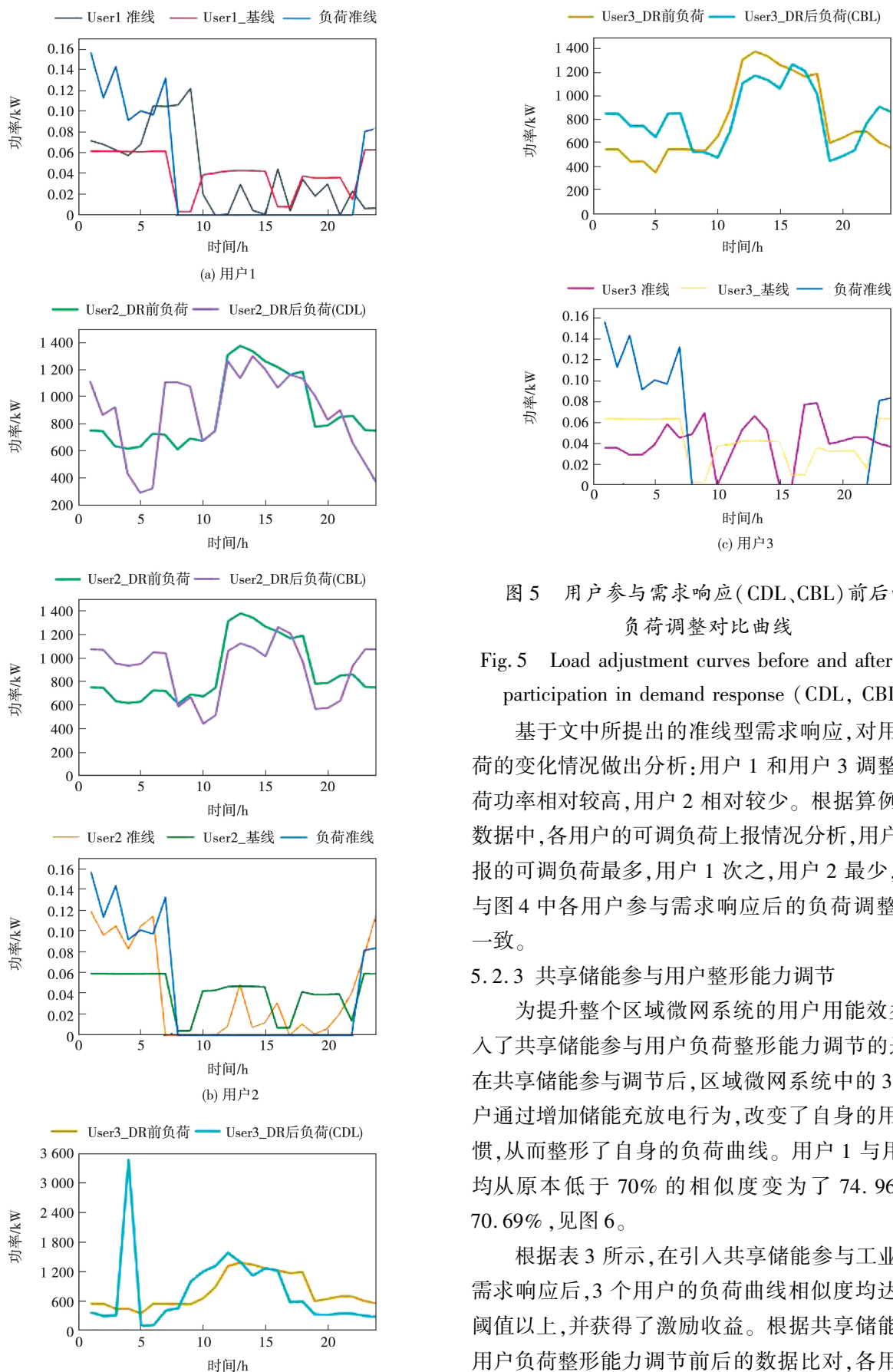


图 5 用户参与需求响应 (CDL、CBL) 前后的
负荷调整对比曲线

Fig. 5 Load adjustment curves before and after user participation in demand response (CDL, CBL)

基于文中所提出的准线型需求响应,对用户负荷的变化情况做出分析:用户 1 和用户 3 调整的负荷功率相对较高,用户 2 相对较少。根据算例原始数据中,各用户的可调负荷上报情况分析,用户 3 上报的可调负荷最多,用户 1 次之,用户 2 最少,这也与图 4 中各用户参与需求响应后的负荷调整情况一致。

5.2.3 共享储能参与用户整形能力调节

为提升整个区域微网系统的用户用能效益,引入了共享储能参与用户负荷整形能力调节的过程。在共享储能参与调节后,区域微网系统中的 3 个用户通过增加储能充放电行为,改变了自身的用电习惯,从而整形了自身的负荷曲线。用户 1 与用户 3 均从原本低于 70% 的相似度变为了 74.96% 与 70.69%,见图 6。

根据表 3 所示,在引入共享储能参与工业用户需求响应后,3 个用户的负荷曲线相似度均达到了阈值以上,并获得了激励收益。根据共享储能参与用户负荷整形能力调节前后的数据比对,各用户的

购电成本以及弃电费用在使用共享储能后都有所下降。其中,用户 1 的净支出减少了 10 949.42 元,用户 2 的净支出减少了 503.51 元,用户 3 的净支出减少了 8 933.77 元。

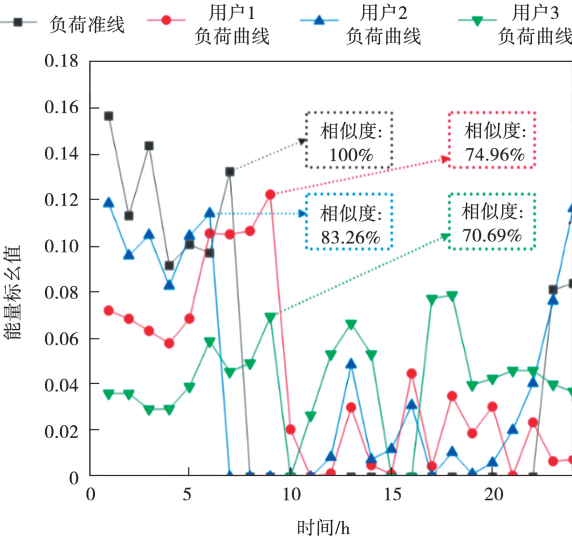


图6 负荷准线及各工业用户负荷曲线(储能参与)
Fig. 6 Load alignment and load curve of each industrial user (energy storage participation)

表 3 共享储能参与用户需求响应支出对比结果
Tab. 3 Comparison results of shared energy storage participating in user demand response expenditure

		用户 1	用户 2	用户 3
共享储能未参与	相似度/%	66.37	83.26	69.70
	激励收益/元	0	7 842.29	0
	购电成本/元	6 780.02	6 433.71	2 928.64
	弃电费用/元	845.10	1.50	2.40
	净支出/元	7 625.12	-1 407.08	2 931.04
共享储能参与	相似度/%	74.96	83.26	70.69
	激励收益/元	9 101.71	6 536.19	8 345.17
	购电成本/元	5 777.41	4 625.60	2 342.44
	弃电费用/元	0	0	0
	净支出/元	-3 324.30	-1 910.59	-6 002.73

图 7 为共享储能在参与用户整形能力调节时的日充放电情况,从图 7 中可见,用户 1 在 12:00 – 17:00 与 18:00 – 20:00 时段对充、放电的需求较大,用户 2 在 10:00 – 12:00 时段对放电的需求较大,用

户 3 在全时段对充、放电的需求较小。这与用户 1 配备的光伏发电设备在中午与下午时段发电过剩,以及用户 2 在上午时段,所配备的风力发电设备发电量不能满足其负荷需求有关。

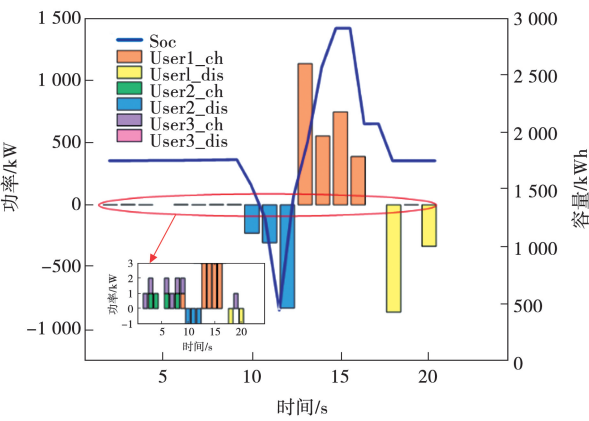


图 7 用户充放电功率与共享储能 SOC 状态曲线

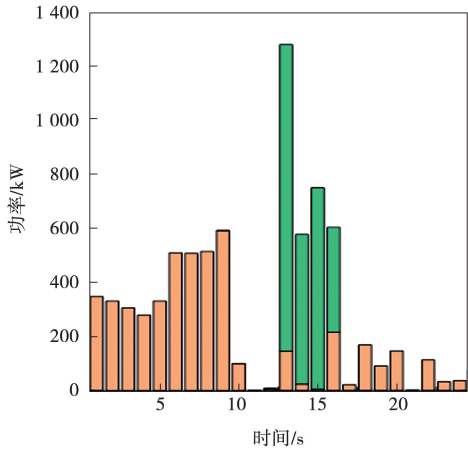
Fig. 7 SOC state curve of user charging and discharging power and shared energy storage

图 8 为各用户在使用共享储能前后上报给区域电网系统自身的可调负荷情况,从 3 个子图对比可知,用户 1 在有共享储能参与整形能力调节下的可调负荷增加比例最大,用户 3 次之,用户 2 最小,这是因为,用户 1 在共享储能参与整形能力调节前负荷曲线相似度为 3 者中最低的,距离阈值差距最大,所以用户 1 需要上报更多的可调负荷并使用共享储能辅助调节其整形能力,而用户 2 对共享储能的使用度最小,由于用户 3 在共享储能参与整形能力调节前负荷曲线相似度距离阈值差距很小,所以其只需上报少量的可调负荷并使用共享储能辅助调节其整形能力,便可达到获得激励收益的目的。

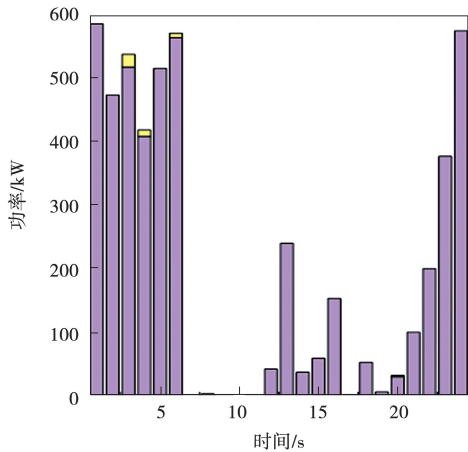
5.2.4 收益分配结果分析

根据表 4 所示,基于 VCG 利益分配机制的内核逻辑,计算可知用户 1 对此微网系统的贡献度最大,利用储能服务进行需求响应后所得的收益最高,因此用户 1 给出的支付也是最多的,占用户层面的支出比例为 98.75%。此分配方案还通过引入再分配因子对初始收益进行重新分配,以缩短投资回本年限,最终计算所得共享储能的投资回本年限约为 5.32 年。

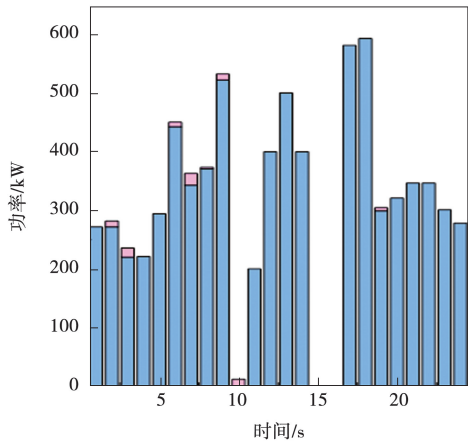
User1_有储能下增加的可调负荷 User2_有储能下增加的可调负荷
User3_有储能下增加的可调负荷 User1_无储能下可调负荷
User2_无储能下可调负荷 User3_无储能下可调负荷



(a) User1储能用户整形能力调节对比



(b) User2储能用户整形能力调节对比



(c) User3储能用户整形能力调节对比

图 8 储能参与或不参与用户整形能力调节下可调负荷对比图

Fig. 8 Contrast diagram of adjustable load with or without user shaping ability adjustment

表 4 共享储能与用户支付分配结果

Tab. 4 Results of shared energy storage and user payment allocation

支付与年限	VCG
用户 1 给出的支付/(万元/年)	40.31
用户 2 给出的支付/(万元/年)	0.32
用户 3 给出的支付/(万元/年)	0.18
共享储能获得的支付/(万元/年)	40.82
共享储能投资回本年限/年	5.32

5.3 敏感性分析

5.3.1 价格因素

将价格因素(包括基准激励单价、弃电惩罚单价、储能运维成本)视为不确定因素,分析基准激励单价、弃电惩罚单价以及储能运维成本对共享储能容量配置结果的敏感性。以表 3 中的各项价格参数为基准,探究上述价格在 $-0.4\% \sim 0.4\%$ 变化时共享储能的配置方案,结果见图 9。

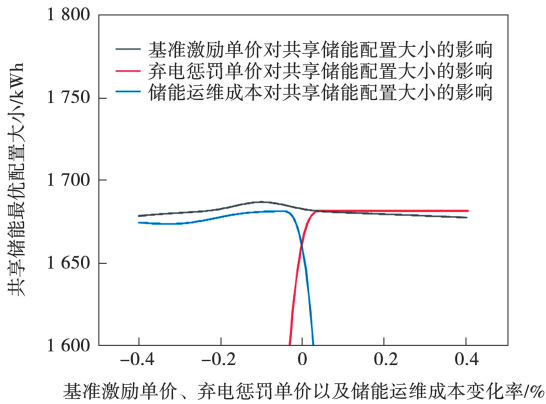


图 9 价格因素对共享储能最优配置大小的敏感性分析

Fig. 9 Sensitivity analysis of price factors to optimal allocation of shared energy storage

根据图 9,可以观察到在三个不确定因素中,弃电惩罚单价和储能运维成本对共享储能最终运行成本的影响较为显著。此外,由于共享储能电站服务于不同的用户,基准激励单价、弃电惩罚单价以及储能运维成本的波动可能会对共享储能配置规模产生不同程度的影响。因此,从共享储能电站最优配置大小的角度来讲,应更关注弃电惩罚单价以及储能运维成本对其配置结果的影响,可较少关注基准激励单价。

5.3.2 负荷因素

就用户负荷参与准线型需求响应的不同占比,对共享储能容量配置的大小做出敏感性分析。其具体分析场景为:在区域内微网系统仅含用户 1 用户 2、仅含用户 1 用户 3 以及仅含用户 2 用户 3 的 3 种情况下,把对应的共享储能最终配置结果或社会福利的变化情况做以比较。

如图 10 所示,有如下结果:

1)在全用户共同参与需求响应并且使用共享储能的情况下,其社会福利达到了日 41 297.71 元,最终优化的容量为 3 400 kWh;

2)无用户 2 参与的新系统社会福利次于第 1 种情况最优容量为 3 200 kWh;

3)无用户 3 参与的新系统社会福利次于第 2 种情况最优容量为 2 000 kWh;

4)无用户 1 参与的新系统社会福利次于第 3 种情况最优容量为 200 kWh。

由此可见,对于用户 1 这样配有光伏发电设备,且参与准线型需求响应前后负荷整形程度最明显的用户类型,对于社会福利的提升具有更大的贡献,对共享储能配置大小的影响也更为显著。

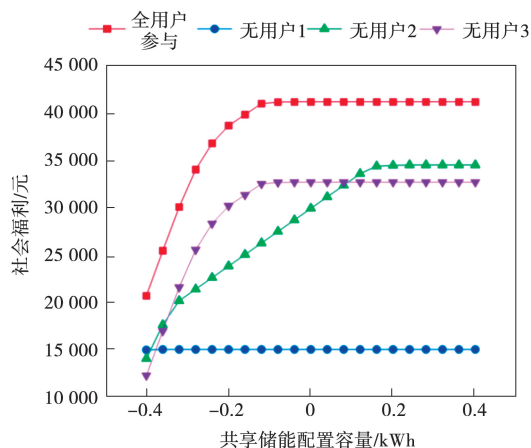


图 10 不同用户参与情况下的储能最优配置容量曲线

Fig. 10 Capacity curve of energy storage optimal configuration with different user participation scenarios

5.3.3 分配方案因素

把基于 Shapley 值的利益分配方案与所提出的基于 VCG 的利益分配方案做以比较,并将对应共享

储能配置的回收周期长短情况做以分析。

根据图 11 所示,可得:

1)基于 Shapley 值的方案相较于 VCG 一阶段的方案,仅突出用户 1 的边际贡献度,使用户 1 在此利益分配方案下支出相对更多的费用给到共享储能,在此方案下共享储能的回收周期为 7.97 年;

2)VCG I 阶段的利益分配方案并未考虑共享储能的初期投资成本,仅将微网系统内各用户主体的收支情况进行了重新整合,在此方案下共享储能的回收周期为 7.98 年;

3)VCG II 阶段的利益分配方案将共享储能的初期投资成本考虑了进来,用户 1 的贡献度最高,应当承担更多的支付费用,在此方案下共享储能的回收周期为 5.32 年,

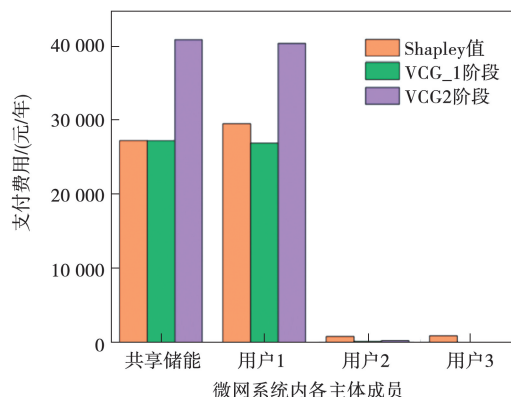


图 11 不同利益分配方案下的各主体收支情况

Fig. 11 Income and expenditure of different subjects under different benefit distribution schemes

6 结论

文章提出了一种考虑用户侧准线型需求响应的共享储能配置模型。该模型分析了第三方投资的集中式共享储能系统运行和成本分摊两个运营过程。通过案例分析,可得出以下结论:

1)基于负荷准线的概念,给出准线型需求响应策略,并提出基于绩效激励机制的准线形成模式和激励补贴策略,使储能系统用户共同发现价值,实现利益最大化。与基线型需求响应相比,准线型需求响应实现了更好的负载跟踪,其负载整形效果更明显;

2)为了激励用户参与准线型需求响应,采用了基于绩效的激励机制来提供收入补贴。在共享储

能的参与下,基于准线型需求响应的用户相似度分别提高了8.59%和0.99%,有效的提高了系统对新能源的吸纳能力;

3)提出了一种基于VCG的市场出清机制,以满足市场出清的个体理性、激励相容和社会福利最大化的激励需求,并使共享储能系统的回报周期缩短了33.33%。用户1的净支出减少了143%,用户2的净支出减少了35%,用户3的净支出减少了304%。

随着对负荷可控潜力的不断探索,考虑具体网络拓扑结构是影响负荷准线在实际能源市场中应用的关键。我们的后续计划是引入位置负荷准线来解决传输和分配网络的拓扑结构。此外,大规模用户需求响应策略的求解需兼顾收敛性与分布性,对异质性用户用电行为的分析与聚类、对需求响应模型的简化与求解也是后续研究的重要方向。

参 考 文 献

- [1] 张莹, 吉治璇, 潘家华. “双碳”目标下的经济社会系统性变革: 特征、要求与路径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2024, 24(1): 101-115.
Zhang Ying, Ji Zhixuan, Pan Jiahua. Systematic economic and social transformation under the “Double carbon” target: characteristics, requirements and paths[J]. Journal of Beijing University of Technology Science (Social Sciences), 2024, 24(1): 101-115.
- [2] 张柠涛, 王茹洁, 汪黎东. 碳中和背景下直接空气捕碳(DAC)的技术发展和经济性评估[J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 15-25.
Zhang Ningtao, Wang Rujie, Wang Lidong. Technology development and economic assessment of direct air capture (DAC) in the context of carbon neutrality[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(5): 15-25.
- [3] Amir S M, Ángel P, Manuel J G, et al. A three-layer game theoretic-based strategy for optimal scheduling of microgrids by leveraging a dynamic demand response program designer to unlock the potential of smart buildings and electric vehicle fleets[J]. Applied Energy, 2023, 347: 121440.
- [4] 徐慧慧, 田云飞, 赵宇洋, 等. 考虑绿证-碳交易的多虚拟电厂混合博弈优化调度[J]. 智慧电力, 2024, 52(3): 1-7, 16.
Xu Huihui, Tian Yunfei, Zhao Yuyang, et al. Optimal scheduling of multiple virtual power plants mixed game considering green certificate and carbon trading[J]. Smart Power, 2024, 52(3): 1-7, 16.
- [5] 段梅梅, 程含渺, 方凯杰, 等. 基于分时电碳耦合定价的虚拟电厂主从博弈策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(11): 1-11.
Duan Meimei, Cheng Hanmiao, Fang Kaijie, et al. Master-slave game strategy of virtual power plant based on time-of-use electricity and carbon coupling pricing[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(11): 1-11.
- [6] 朱月尧, 祁佟, 吴星辰, 等. 计及实时碳减排的产消群价格型需求响应机制[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(4): 452-463.
Zhu Yueyao, Qi Tong, Wu Xingchen, et al. Price-based demand response mechanism[J]. Acta Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(4): 452-463.
- [7] Shehzad A M H, Ussama A, Umar F, et al. Dynamic price-based demand response through linear regression for microgrids with renewable energy resources[J]. Energies, 2022, 15(4): 1385-1385.
- [8] 许信义. 电力市场动态需求响应建模与优先级排序研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2020.
Xu Xinyi. Study on dynamic demand response modeling and priority ranking in power market[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2020.
- [9] 南斌, 董树锋, 唐坤杰, 等. 考虑需求响应和源荷不确定性的光储微电网储能优化配置[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1340-1352.
Nan Bin, Dong Shufeng, Tang Kunjie, et al. Optimal configuration of energy storage in optical microgrid considering demand response and source load uncertainty[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1340-1352.
- [10] Duc T N, Thanh S T, Van L D, et al. Impact of renewable energy integration on a novel method for pricing incentive payments of incentive-based demand response program[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022(8): 16.
- [11] 曹琛. 考虑用户舒适度及用户基线负荷的需求侧负荷控制策略研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
Cao Chen. Study on demand-side load control strategy considering user comfort and user baseline load[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [12] 殷爽睿, 艾芊, 王大鹏, 等. 考虑空调负荷虚拟储能的产消者鲁棒日前申报策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 24-34.
Yin Shuangrui, Ai Qian, Wang Dapeng, et al. Robust declaration strategy of prosumer considering virtual energy storage of air conditioning load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 24-34.
- [13] 何旭东, 刘炜焘, 郑宇辰, 等. 双碳目标下需求侧参与的电力市场电能响应相关策略研究[J]. 电测与仪表,

- 2025, 62(12): 41-47.
- He Xudong, Liu Weitao, Zheng Yuchen, et al. Research on the strategies of power market response with demand-side participation under the dual carbon goals[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(12): 41-47.
- [14] 吕斌, 黄丹, 丁宏, 等. 基于共享储能的台区多元负荷协同控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(1): 32-39.
- Lü Bin, Huang Dan, Ding Hong, et al. Co-control strategy of multi-unit load based on shared energy storage[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(1): 32-39.
- [15] Zhang W Y, Zheng B, Wei W, et al. Peer-to-peer transactive mechanism for residential shared energy storage[J]. *Energy*, 2022, 246: 123204.
- [16] 于唯一, 王慧芳, 曹芬, 等. 考虑场景缩减和动态寿命的用户侧新能源配储研究[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(9): 127-136.
- Yu Weiyi, Wang Hui Fang, Cao Fen, et al. Research on user-side new energy distribution and storage considering scenario reduction and dynamic life[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(9): 127-136.
- [17] 任宇路, 程昱舒, 张雪瑞, 等. 碳交易下含氢储能的综合能源系统运行优化[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(12): 11-19.
- Ren Yulu, Cheng Yushu, Zhang Xuerui, et al. Operation optimization of integrated energy system with hydrogen energy storage under carbon trading[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(12): 11-19.
- [18] 谢开, 刘敦楠, 李竹, 等. 适应新型电力系统的多维协同电力市场体系[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(4): 2-12.
- Xie Kai, Liu Dunnan, Li Zhu, et al. Multi-dimensional cooperative power market system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(4): 2-12.
- [19] 李彬, 曹望璋, 张洁, 等. 基于异构区块链的多能系统交易体系及关键技术[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(4): 183-193.
- Li Bin, Cao Wangzhang, Zhang Jie, et al. Multi-energy system trading system based on heterogeneous block chain and its key technology[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(4): 183-193.
- [20] 李咸善, 王苗. 考虑源荷不确定性的多微电网鲁棒优化调度与VCG机制竞价策略[J]. *电网技术*, 2023, 47(6): 2330-2345.
- Li Xianshan, Wang Miao. Robust optimal scheduling and VCG bidding strategy for multi-microgrid systems with source-load uncertainty[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(6): 2330-2345.
- [21] 刘达, 何万强, 李金孟, 等. 考虑用户碳配额的售电公司新能源电力购售策略研究[J]. *智慧电力*, 2024, 52(1): 14-22.
- Liu Da, He Wanqiang, Li Jinmeng, et al. Renewable energy electricity purchasing and selling strategy for power selling company considering carbon allowance for users[J]. *Smart Power*, 2024, 52(1): 14-22.
- [22] Guo C, Xie J, Chen X, et al. An incentive-compatible energy pricing mechanism for electricity-gas interconnected system using vickrey-clarke-groves mechanism design theory[C]//2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), IEEE, 2020.
- [23] 姚垚, 张沛超, 王永权. 温控负荷参与快速频率调整的双层控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(17): 4987-4998, 5296.
- Yao Yao, Zhang Peichao, Wang Yongquan. Dual layer control method for temperature controlled load participating in rapid frequency adjustment[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(17): 4987-4998, 5296.
- [24] 徐博强, 张沛超, 何光宇, 等. 基于主从博弈的热水器集群的负荷准线控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(21): 7785-7797.
- Xu Boqiang, Zhang Peichao, He Guangyu, et al. Load quasi-line control method of water heater cluster based on master-slave game[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(21): 7785-7797.
- [25] Ma L, Li X, Du X, et al. Optimal configuration of shared energy storage considering the incentive-based demand response[C]//2022 6th International Conference on Power and Energy Engineering (ICPEE), Shanghai, China, 2022: 288-293.
-
- 收稿日期: 2024-12-24; 修回日期: 2025-12-27
- 作者简介:
- 尹翔(1986—),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网规划设计、储能及新型电力系统。
E-mail:yinxiang524@sina.com
- 李建林(1976—),男,通信作者,博士,教授,研究方向为新型储能规划化应用。E-mail:dkyljl@163.com
- 张效俊(1978—),男,高级工程师,研究方向为电网规划设计。
- 刘岩(1989—),男,高级工程师,研究方向为电网检修试验。
- 程石(1985—),男,高级工程师,研究方向为电网运行、安全管理。
- (编辑 杜景飞)