



基于改进 Myerson 值法的云储能双层优化运营模型

魏震波, 李银江, 张雯雯, 杨超

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610000)

摘 要: 为深度挖掘集中式共享储能与分布式储能的在未来新型能源结构中的作用, 提出了一种考虑多主体价值协同的云储能双层优化运营模型。首先, 建立了综合利用共享储能规模效应和分布式储能用户互补性的云储能双层模型。其中, 上层目标函数为考虑共享储能全生命周期成本的日经济效益最优; 下层以用户联盟日运行成本最低为目标, 并通过目标级联分析法 (ATC) 双层并行优化求解。为兼顾各参与主体利益及实现路径, 提出改进 Myerson 值法解决链式联盟成本分摊和用户群带来的维数灾问题。最后, 仿真结果表明, 该模型可进一步提升社会整体层面对清洁能源的消纳能力, 且所提成本分摊方法能实现多方共赢, 为未来用户侧大规模储能应用提供参考。

关键词: 云储能; 新能源消纳; 目标级联分析法; 改进 Myerson 值法; 成本分摊

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202212071

0 引言

在“双碳”背景下, 清洁能源在电力系统中的渗透率逐步提高, 然而风光等可再生能源的随机性对电网提出严苛挑战^[1-2]。因此, 具有平抑可再生能源出力波动、削峰填谷能力的储能, 在政策和资本共同助力下其发展达到了空前的高度, 尤其是电化学储能^[3-6]。其中以产消者为核心的分布式储能主要适用于中小型企业用户, 而以共享经济为核心的集中式共享储能主要以政府与行业巨头共同牵头。两者均为现阶段的研究热点。

目前, 分布式储能主要集中在用户侧, 文献^[7]考虑用户侧分布式储能源荷不确定性, 通过鲁棒优化有效提高系统消纳水平和经济效益, 但未考虑储能投资成本, 缺乏市场主体引导消纳率进一步提高。文献^[8]引入共享概念, 建立集中式共享储能的社区综合能源系统模型, 验证共享储能有助于用户合理优化用能安排, 从而降低用能费用。文献^[9]将共享储能应用到工业用户经济调度中, 有利于储能高效应用促进新能源消纳。文献^[10]指出一体化式共享储能可在任意时刻

只能处于充电或放电单一状态, 无法兼顾不同类型用户的用电需求, 缺乏灵活性。因此如何利用用户侧分布式储能与集中式共享储能协同, 联合构建云储能系统, 值得进一步研究^[11-14]。

此外, 针对多利益主体系统还需考虑合作成本的合理分配问题。文献^[15]采用 Shapley 值法对含共享储能的多微网系统进行成本分摊, 保证了分配的公平性。但 Shapley 值法仅适用于联盟内任意 2 个成员均能合作的“完全合作”系统, 无法适用于跨区的分布式储能。文献^[16]通过 Owen 值法进行 2 次成本分摊, 解决多区问题, 确保合作可行性。然而文献^[17]指出 Owen 值法具有不同的同盟成员之间完全没有合作可能性的数学基础。因此, 如何针对新型电力系统中可合作的链式联盟进行合理的成本分摊, 是一个需要深入研究的问题。

为此, 本文提出一种分布式储能与集中式储能协调的云储能优化配置与调度方法, 通过目标级联分析法 (ATC) 算法构建双层优化模型满足各主体利益诉求。上层考虑储能运营商的投资利用率问题, 通过计及全生命周期成本提高日净利润; 下层考虑用户用电成本问题, 建立日经济最优模型。在此基础上, 通过改进 Myerson 值法解决非完全合作联盟成本分摊问题, 并通过算例仿真验证所提模型的有效性。

收稿日期: 2022-12-20; **修回日期:** 2023-06-07。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (配电网弱中心化结构下多元主体互动博弈与分层自治运行管理, 52077146)。

1 云储能系统及运营模式

本文所研究的云储能系统如图 1 所示，系统主要分为分布式储能整合与集中式储能共享两大部分。分布式储能整合是将不同的产消者整合为合作联盟，其中产消者为具备清洁能源出力的电力用户，而合作联盟内部成员以联盟整体最优参与调配，实现储能设备及容量共用。当联盟成员出现多余的能量需要弃掉时，则可存储在其他成员的闲置设备中；而当联盟成员出现功率缺额时也可从其他成员的储能设备中进行调用。对于共用的储能设备的充放电仅须支付一定的储能设备折旧费用，最终成员用电费用根据贡献度进行合理分配。通过用户互补性可以大幅度减少用户的购电成本并且提高清洁能源消纳率。集中式储能共享是储能电站运营商建立集中式的共享储能电站为用户联盟提供储能充放电服务。用户联盟通过向共享储能站支付或收取分时购售电价，以及部分服务费，换取集中式共享储能电站的充放电服务，进一步提高云储能模式的清洁能源消纳率，并且实现不同产消者与储能电站运营商的多方共赢。

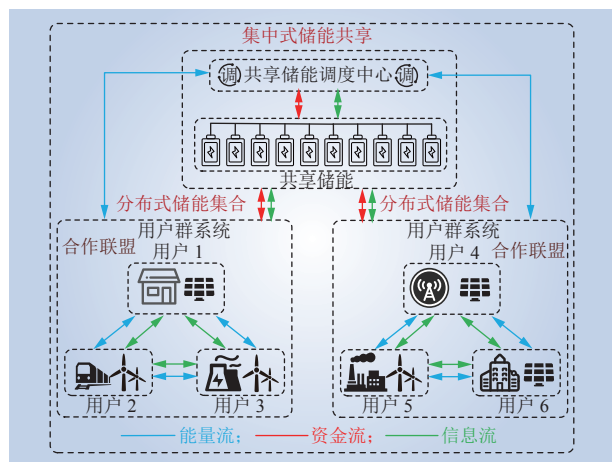


图 1 云储能系统

Fig. 1 Cloud energy storage system

合作联盟内部各个产消者根据自身历史数据，如清洁能源出力、日负荷曲线和自身储能使用情况等，参与优化调度模型计算。再以联盟的形式与共享储能站签订储能电站的服务协议，约定充放电功率计划与储能容量等。其中优先使用联盟内部储能，考虑共享储能分时购售电价，以运行成本最优为目标进行联合优化调度。分布

式储能集合利用产消者的互补性，可以大幅度减少对储能设备的使用以及联盟向共享储能的调用。

集中式共享储能电站设置调度中心，根据每个时段联盟的充放电需求进行运行调度。联盟的充放电行为以购售电形式进行结算。共享储能站设置分时购售电价，主要以用户购售电价格差实现盈利，此外联盟对于共享储能站的充放电行为均以单位功率收取服务费。集中式储能电站利用规模效益可大幅度降低电站的建设成本，缩短投资回报年限。

2 云储能双层优化运营模型

2.1 上层模型

2.1.1 上层目标函数

基于云储能的共享储能电站以计及全生命周期成本的日经济效益最大为目标函数，其中全生命周期成本包括投资成本、维护成本、替换成本、购电成本和回收成本；经济效益由共享储能服务费和售电效益组成，即

$$\max F = C_{ben} - C_{lif} \rightarrow \min F_1 = C_{lif} - C_{ben} \quad (1)$$

$$\begin{cases} C_{ben} = C_{ser} + C_{sel} \\ C_{lif} = C_{inv} + C_{o,m} + C_{rep} + C_{pel} + C_{eol} \end{cases} \quad (2)$$

式中： F 为计及全生命周期成本的日经济效益； F_1 为计及全生命周期成本的日经济损失； C_{ben} 为电站的日经济效益； C_{lif} 为电站的全生命周期成本； C_{ser} 为用户群使用共享储能电站的服务费； C_{sel} 为用户群向共享储能电站支付的购电费用； C_{inv} 为电站的投资成本； $C_{o,m}$ 为电站的维护成本； C_{rep} 为电站的替换成本； C_{pel} 为电站的购电成本； C_{eol} 为电站的回收成本。

$$\begin{cases} C_{ser} = \sum_{k=1}^N \sum_{t=1}^T \xi(t) [P_{sb,k}(t) + P_{ss,k}(t)] \\ C_{sel} = \sum_{k=1}^N \sum_{t=1}^T \Omega(t) P_{sb,k}(t) \\ C_{pel} = \sum_{t=1}^T [\alpha(t) P_g(t) + \sum_{k=1}^N \mathcal{U}(t) P_{ss,k}(t)] \\ C_{inv} = \frac{C_p P_{max}^{ess} + C_e E_{max}^{ess}}{Dr}, C_{o,m} = \frac{C_p^{com} P_{max}^{ess} + C_{labor}}{r} \\ C_{rep} = \frac{M_{rep} C_p^{rep} P_{max}^{ess}}{r}, C_{eol} = \frac{F_{eol} C_{inv}}{Dr} \end{cases} \quad (3)$$



式中: N 为合作联盟个数; T 为调度时长, 本文为 24 h; $\zeta(t)$ 为共享储能单位服务费; $P_{sb,k}(t)$ 为联盟 k 在时段 t 从储能电站购电的功率; $P_{ss,k}(t)$ 为联盟 k 在时段 t 向储能电站售电的功率; $\Omega(t)$ 为时段 t 储能电站的购电电价; $\alpha(t)$ 为时段 t 从电网购电电价; $P_g(t)$ 为电站在时段 t 从电网购电的功率; $\mathcal{O}(t)$ 为时段 t 储能电站的售电电价; C_p 为单位功率投资成本; $P_{\max}^{\text{ess}}$ 为功率容量; C_e 为单位容量投资成本; $E_{\max}^{\text{ess}}$ 为储能容量; D 为储能系统运营周期; r 为年运行天数。 C_p^{om} 为单位功率年维护成本; C_{labor} 为年人工运营成本; C_p^{rep} 为单位功率替换成本; M_{rep} 为替换次数; F_{col} 为报废成本率。

2.1.2 上层模型约束条件

共享储能电站约束条件包括储能充放电平衡约束和荷电连续性约束^[18]。

1) 共享储能充放电功率约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{sb,k}(t) \leq P_{\max}^{\text{ess}} U_b^{\text{ess}} \\ 0 \leq P_{ss,k}(t) \leq P_{\max}^{\text{ess}} U_s^{\text{ess}} \\ U_b^{\text{ess}} U_s^{\text{ess}} = 0 \\ U_b^{\text{ess}} \in \{0, 1\}, U_s^{\text{ess}} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (4)$$

式中: U_b^{ess} 、 U_s^{ess} 分别为储能电站充、放电状态位, 属于布尔型变量。

2) 共享储能荷电连续性约束为

$$\begin{cases} E^{\text{ess}}(t+1) = (1-\chi)E^{\text{ess}}(t) + \left[\eta^{\text{abs}} P_{\text{abs}}^{\text{ess}}(t) - \frac{P_{\text{relea}}^{\text{ess}}(t)}{\eta^{\text{relea}}} \right] \\ 0.1E_{\max}^{\text{ess}} \leq E^{\text{ess}}(t) \leq 0.9E_{\max}^{\text{ess}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: χ 为储能自放电功率; η^{abs} 、 η^{relea} 分别为储能的充、放电效率; $E^{\text{ess}}(t)$ 为共享储能在时段 t 的电量; $P_{\text{abs}}^{\text{ess}}(t)$ 、 $P_{\text{relea}}^{\text{ess}}(t)$ 分别为共享储能在时段 t 的充放、电功率。

2.2 下层模型

2.2.1 下层目标函数

基于云储能的产消者合作联盟以日运行经济最优为目标函数, 其中日运行成本包括用户向电网购电费用、用户使用共享储能电站的服务费、用户向共享储能电站的购售电费用以及用户内部储能使用成本, 即

$$\min F_2 = C_{\text{grid}} + C_{\text{ser}} + C_{\text{sta}} + C_{\text{cost}} \quad (6)$$

式中: F_2 为产消者合作联盟云储能日运行经济成本; C_{grid} 为用户向电网支付的购电费用; C_{sta} 为用户向共享储能电站支付的购售电费用; C_{cost} 为

用户内部储能使用成本。

$$\begin{cases} C_{\text{grid}} = \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T \alpha(t) P_{g,j}(t) \\ C_{\text{sta}} = \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T [\Omega(t) P_{sb,j}(t) + \mathcal{O}(t) P_{ss,j}(t)] \\ C_{\text{cost}} = \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T \mu [P_{ob,j}(t) + P_{os,j}(t)] \end{cases} \quad (7)$$

式中: M 为合作联盟内用户个数; $P_{g,j}(t)$ 为用户 j 在时段 t 从电网购电的功率; μ 为储能的功率损耗成本系数, 此处取 0.01 元/(kW·h)^[19]; $P_{ob,j}(t)$ 、 $P_{os,j}(t)$ 分别为用户 j 在时段 t 使用自身储能充放电功率。

2.2.2 下层模型约束条件

云储能系统考虑在同一节点运行, 忽略线路和设备损耗。约束条件包括功率平衡约束、储能荷电连续性约束、自身储能充放电功率约束^[20]、储能充放电平衡约束。

1) 功率平衡约束为

$$P_{pv,j}(t) + P_{\text{wind},j}(t) + P_{ob,j}(t) + P_{sb,j}(t) + P_{g,j}(t) = P_{os,j}(t) + P_{ss,j}(t) + P_{\text{load},j}(t) \quad (8)$$

式中: $P_{pv,j}(t)$ 、 $P_{\text{wind},j}(t)$ 分别为用户 j 在时间段 t 的光伏和风电出力; $P_{\text{load},j}(t)$ 为用户 j 在时间段 t 的电力负荷。

2) 自身储能荷电连续性约束为

$$\begin{cases} E(t+1) = (1-\chi)E(t) + \left[\eta^{\text{abs}} P_{\text{abs}}(t) - \frac{P_{\text{relea}}(t)}{\eta^{\text{relea}}} \right] \\ 0.1E_{\max} \leq E(t) \leq 0.9E_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $E(t+1)$ 、 $E(t)$ 分别为自身储能在时段 $t+1$ 和 t 的电量; $P_{\text{abs}}(t)$ 、 $P_{\text{relea}}(t)$ 分别为自身储能在时段 t 的充、放电功率; $E_{\max}$ 为自身储能容量。

3) 自身储能充放电功率约束为

$$\begin{cases} \left| \frac{E(t+1) - E(t)}{\delta(t)} \right| \leq P_{\max} U_b, P_{os,j}(t) \leq P_{ob,j}(t) \\ \left| \frac{E(t+1) - E(t)}{\delta(t)} \right| \leq P_{\max} U_s, P_{os,j}(t) > P_{ob,j}(t) \\ U_b U_s = 0 \\ U_b \in \{0, 1\}, U_s \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{\max}$ 为自身储能充放电功率最大值; U_b 、 U_s 分别为自身储能充放电状态位, 属于布尔型变量; $\delta(t)$ 为时间间隔。

4) 自身储能充放电平衡约束。用户向储能电站购售电之和等于储能电站充放电功率。用户向



自身储能充放电之和等于自身储能充放电功率，即

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N [P_{sb,j}(t) - P_{ss,j}(t)] = P_{relea}^{ess}(t) - P_{abs}^{ess}(t) \\ \sum_{k=1}^N [P_{ob,j}(t) - P_{os,j}(t)] = P_{relea}(t) - P_{abs}(t) \end{cases} \quad (11)$$

2.3 ATC 算法求解流程

ATC 是一种将复杂问题层级式分解求优的协调设计方法。其突出特点是各层子系统独立自主求解，并行优化满足子系统目标最优，再通过耦合变量迭代达到全系统最优。在具有其他常用求解方法优点，如保护用户隐私、复杂数据简化等以外，其层级结构特性与云储能中“共享储能+分布式储能”模式更加匹配，并且符合多利益主体利己的经济学原则。基于此，本文采用 ATC 算法定义通信变量如下。

$$\begin{cases} P_k^{dis}(t) = \sum_{j=1}^M [P_{sb,j}(t) - P_{ss,j}(t)] \\ P_k^{sha}(t) = P_{sb,k}(t) - P_{ss,k}(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中： $P_k^{dis}(t)$ 、 $P_k^{sha}(t)$ 分别为分布式合作联盟和共享储能对应的通信变量。

之后，假设先一步求解下层分布式储能自身优化调度问题，将其得到的通信变量解以参数形式传递给上层共享储能。上层区域与下层结果相协调，在目标函数中添加增广拉格朗日惩罚项，则目标函数修改如下。

1) 下层分布式储能联盟。

合作联盟内多个用户实现电能共享，以联盟形式同上层共享储能进行电能交易。目标函数优化模型为

$$\min F_2 + \sum_{t=1}^T \beta_{k,t} (P_k^{sha} - P_k^{dis}) + \sum_{t=1}^T \left[\gamma_{k,t} (P_k^{sha} - P_k^{dis})^2 \right] \quad (13)$$

式中： $\beta_{k,t}$ 、 $\gamma_{k,t}$ 分别为拉格朗日一次项和二次项惩罚因子。

2) 上层共享储能。

共享储能调度中心得到下层多个联盟传递的通信变量，将目标函数修改为

$$\min F_1 + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^N \beta_{k,t} (P_k^{sha} - P_k^{dis}) + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^N \left[\gamma_{k,t} (P_k^{sha} - P_k^{dis})^2 \right] \quad (14)$$

由此可见，上下层通信变量的偏差值会导致上层经济效益减少和下层用电成本增加，使得当前迭代解非最优解。因此，更新通信变量并根据式 (15) (16) 修改惩罚因子，直到满足收敛条件式 (17) (18)，完成迭代，获得系统最优解。

$$\beta_{k,t}(z+1) = \beta_{k,t}(z) + 2\gamma_{k,t}^2 [P_k^{sha}(z) - P_k^{dis}(z)] \quad (15)$$

$$\gamma_{k,t}(z+1) = h\gamma_{k,t}(z) \quad (16)$$

$$|P_k^{sha}(z) - P_k^{dis}(z)| \leq \varepsilon_1 \quad (17)$$

$$\left| \frac{\sum_x F_{x,z+1} - \sum_x F_{x,z}}{\sum_x F_{x,z+1} + \sum_x F_{x,z}} \right| \leq \varepsilon_2 \quad (18)$$

式中： z 为迭代次数； h 一般为大于 1 的数，本文取 1.2； ε_1 和 ε_2 为收敛精度。

3 基于改进 Myerson 值法的成本分摊

电力系统中合作联盟通常用 TU-对策，即可转移效用合作对策来表征联盟通过合作后产生共同利益的模型。Shapley 值法得到了最为广泛的应用，其底层逻辑是任意参与者的集合都能形成可行联盟并产生效用。显然在云储能多利益主体的复杂系统中，由于物理或实际交易等多种因素制约，并不是所有参与者都能形成所谓的可行联盟，Shapley 值法也不再具有实际可行意义。

3.1 Myerson 值与图理论

诺贝尔经济学奖得主 Myerson 将图理论引入 TU-对策，形成具有网络结构的合作博弈。在图中 Myerson 认为只有连通的联盟才能形成可行联盟，而不连通的联盟 S 只能通过分支获得效益。从而定义了图限制 (N, v^L) ，将其转化为可通过 Shapley 值法求解的形式，使得任意图都可求解，即

$$\sigma(N, v, L) = Sh(N, v^L) \quad (19)$$

式中： (N, v) 为 TU-对策； v 为 N 的子集族上的特征函数； (N, L) 为图；在图中顶点集 N 表示参与者的集合；边集 L 表示 2 个参与者之间的通信关系。

可使用式 (20) (21) 求解成本。

$$W(|S|) = \frac{(n-|S|)! (|S|-1)!}{n!} \quad (20)$$

$$X_i = \sum_{S_i \in S} W(|S|) [C(S) - C(S/i)] \quad (21)$$



式中： $W(|S|)$ 为形成联盟 S 的概率； n 为联盟子集总数； X_i 为分配成本； $C(S)$ 、 $C(S/i)$ 分别为联盟中有、无成员 i 所产生的成本。

由此得出，当联盟为完整连通图时，Myerson 值就是 Shapley 值法。

3.2 组内 Myerson 值和组间 Myerson 值

参与者间的位置与联系以图的形式所展开，Myerson 值法根据参与者紧密通讯能力和联盟贡献度综合给出成本分摊数额。可将其分解为组内与组间 2 种值。

分布式储能各个合作联盟内部成员 i ，通过参与合作，贡献出闲余储能容量使得联盟 S 所减少的用电成本，则成为组内 Myerson 值 σ_i^W ，表征用户为联盟内部成员所分配的收益，计算式为

$$\sigma_i^W(N, v, L) = Sh_i(N, v_i^L) \quad (22)$$

$$C_i(S) = \begin{cases} C(S) - C(S/i), & S \subseteq N, i \in S \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

当某云储能系统参与者不属于某一联盟，但对于该联盟的形成具有必要的连通作用，如共享储能电站对于分布式储能各联盟间的能量与信息交易所体现的平台与中介作用，该部分收益则成为组间 Myerson 值 σ_i^B ，即

$$\sigma_i^B(N, v, L) = Sh_i[N, (v - v_i)^L] \quad (24)$$

3.3 改进 Myerson 值法

Myerson 值法具有 Shapley 值法不具备的“非全图”性和 Owen 值法不具备的跨联盟合作性，与以共享储能为中介的云储能系统高度契合。分布式储能联盟内部以组内 Myerson 值法分摊成本，而跨联盟合作以共享储能为平台实现组间 Myerson 值法，给予共享储能图形式的分支收入。但云储能系统储能规模数量庞大，Myerson 值法转换为图限制的 Shapley 值法后因计算的复杂程度 $O(n!)$ 陷入维数灾难。因此，本文引入双边 Shapley 值法，采用改进 Myerson 值法进行成本分摊。

双边 Shapley 值法大幅度降低计算量，通过 $O(n)$ 次计算即可得到较高精度的解。云储能系统每个参与者的成本为

$$X_i(S) = \frac{1}{2}C(S_i) + \frac{1}{2}[C(S) - C(S/i)] \quad (25)$$

式中： $C(S_i)$ 为参与者 i 独立运行时的成本。

4 算例分析

4.1 实验数据

算例采用的云储能系统包含 2 个合作联盟，每个联盟下有 3 个产消者，配有储能容量为 500 kW·h，充放电功率限额均为 100 kW。用户群典型日运行负荷及清洁能源出力如图 2 所示。电网购电电价采用四川省分时电价，用户群与储能电站间购售电价参考文献 [21]。共享储能电站的服务费为 0.05 元/(kW·h) [22]，用户群自身储能的功率成本损耗系数取 0.01 元/(kW·h)。储能电站的充放电效率取 0.98，荷电状态区间为 0.1~0.9，初始值为 0.2。储能电站的容量成本采用 2022 年湖北共享储能项目中标价格 1200 元/(kW·h)，功率成本为 1000 元/(kW·h)，运维成本为 72 元/(a·kW) [23]。电站全生命寿命周期为 20 年，在第 13 年进行电池等替换 [24]。惩罚因子和收敛精度均取 5×10^{-3} 。

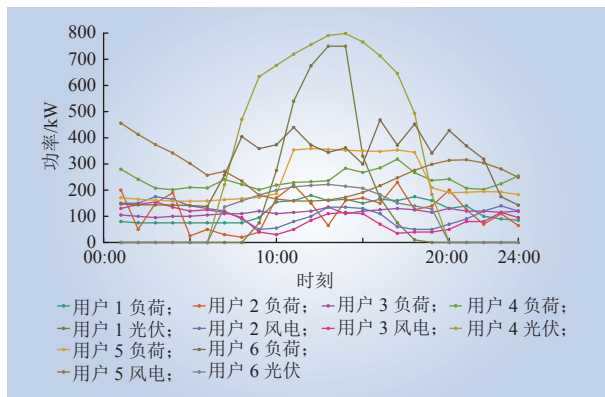


图 2 用户电负荷及清洁能源出力

Fig. 2 Consumer electricity load and new energy output

4.2 实验分析

4.2.1 典型场景分析

为验证模型合理性，本文对以下 4 种场景进行对比分析。优化模型以 24 h 为一个运行周期，每个时段长度为 1 h，包含 24 个时段。场景 1：产消者独立运行；场景 2：仅使用分布式储能；场景 3：仅使用共享储能；场景 4：使用云储能模型。

各场景成本及清洁能源消纳率如表 1 所示。由表 1 可知，场景 1 的总运行成本远超场景 2，但分布式储能使用成本却很低。这是由于各个用户只能调用自身的储能，无法起到很好的削峰填谷作用，导致大量的电网购电与弃电，因此消纳率

表 1 各场景成本及消纳率

Table 1 Cost and consumption rate of each scenario

场 景	总运行 成本/元	电网购电 成本/元	分布式储能 成本/元	共享储能 净利润/元	消纳率/ %
1	9937.54	9910.30	27.24	0	63.3
2	4618.98	4473.31	145.67	0	89.5
3	5115.44	2598.52	0	-1055.10	100.0
4	2023.46	1178.66	145.76	505.40	100.0

也只有 63.3%。场景 2 用户间可以相互调用储能，体现了用户互补性，总运行成本比场景 1 减少 53.2%，将更多清洁能源进行消纳，消纳率提高到 89.5%，然而储能成本增加，是由于用户间在各个时段对储能的灵活调用导致。场景 3 引入共享储能电站实现清洁能源全消纳，然而总运行成本较场景 2 增加 10.8%，并且储能电站净利润为 -1055.10 元，呈现亏损状态。场景 4 共享储能电站的配置结果为容量 3764.3 kW·h，最大充放电功率为 553.7 kW。其日经济效益为 699 元，因此全生命周期日成本占总收益的 27.7%。场景 4 在场景 3 的基础上总运行成本减少 60.4%，从电网购电成本减少 54.6%，大幅减少电网压力。储能运营商也实现盈利 505.40 元，这表明云储能模型能实现分布式储能整合使用与集中式储能灵活共享，降低云储能用户用电成本且储能运营商具有盈利空间，云储能架构在理论上具备可行性。在此基础上，进一步对场景 4 的迭代收敛和用户调度策略进行具体分析。

4.2.2 双层迭代结果及其分析

建立云储能双层迭代模型，ATC 算法收敛条件参考式 (17) (18)，算法收敛迭代过程如图 3 所示。

可以看出，ATC 算法在第 31 次迭代时达到收敛精度，仿真时长为 311.88 s。图 3 a) 收敛条件 1 的物理意义为分布式储能联盟与共享储能申请交换功率的差值，因此具有时间特性，呈现 12:00 光照最强烈和晚间用电高峰时段差值更大的特点。图 3 b) 收敛条件 2 表示整个系统成本随着迭代的趋稳性。本文设定第一次迭代值为 1。

为了更好地对优化结果进行分析，在此各任选取 2 个联盟中的用户，根据仿真结果得到具体的调度策略，如图 4 和图 5 所示。

联盟 1 中某用户各设备出力如图 4 所示。由

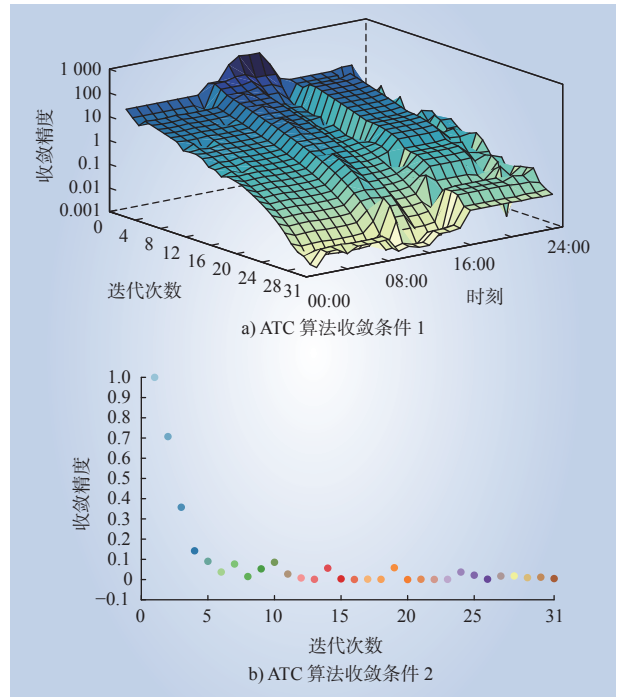


图 3 算法收敛迭代过程

Fig. 3 Iterative process of algorithm convergence

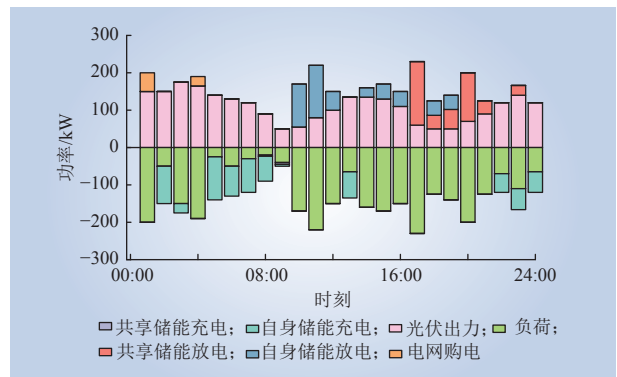


图 4 联盟 1 用户各设备出力

Fig. 4 Each equipment output of alliance 1

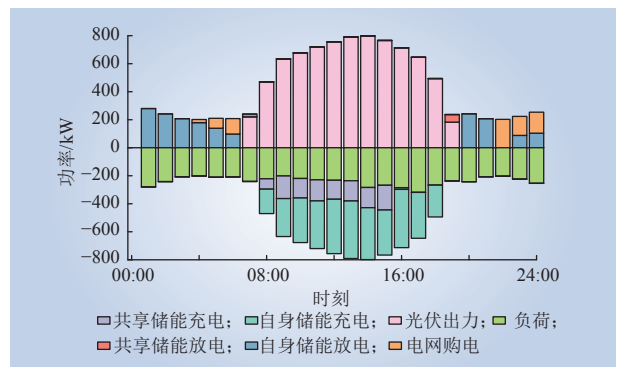


图 5 联盟 2 用户各设备出力

Fig. 5 Each equipment output of alliance 2



于风电出力的波动性,因此需要频繁调用储能设备满足负荷需求。其中 00:00—04:00 谷时电价更便宜,采用电网购电平衡负荷,而 10:00—19:00 则主要调用联盟内部分布式储能实现就地平衡。当晚间用电高峰时段,自身储能不足以支撑,则以低于电网购电价格通过共享储能放电,符合经济最优。

联盟 2 中某用户各设备出力如图 5 所示。该用户负荷较为平稳,但由于光伏的自身特性,因此无光照期间均通过云储能系统和电网购电满足需求。并且可以看出电网购电均不在电价峰段,符合用户自身利益。而在 07:00—19:00 时段里,主要通过光伏平衡负荷,对储能系统进行大量充电,在实现套利的同时,以便在用电高峰期能放电使用,实现用电负荷转移,减少电网压力。

4.2.3 改进 Myerson 值法成本分摊分析

用户均以联盟的形式参与云储能调配,但各用户对储能的利用率不同,对于合作联盟贡献程度就不同。基于公平性原则,贡献率越高的用户成本分摊则应越少,符合成本分摊原则。各用户的边际成本如表 2 所示,用户参与云储能后成本比较如表 3 所示。

表 2 各用户边际成本
Table 2 Marginal cost of each user

联盟	用户	$C(s)$	$C(s/i)$	$C(s)-C(s/i)$
1	1	1200.76	2270.58	-1069.82
	2	898.12	1853.74	-955.62
	3	753.47	1730.98	-977.51
2	4	1569.22	3439.60	-1870.38
	5	1108.58	2270.97	-1162.39
	6	4407.40	1775.09	2632.31
共享储能		0	4618.98	-4618.98

结合表 2 和表 3 可知,系统中所有用户和储能运营商运行成本均小于独立成本,满足合作条件。其中仅用户 6 的边际成本为正值,是因为其用电负荷大于自身光伏出力,需要大量调动储能满足需求导致,因此 Myerson 值最高为 1533.87 元,但也节约成本 65.2%。最终共享储能电站收益为 855.11 元,较表 2 的净利润增加了 349.71 元,其中一部分是云储能系统中最为重要的中介与平台

表 3 用户合作成本比较
Table 3 Cost comparison of user cooperation

用户	Myerson	独立成本	节约成本
1	314.18	1200.76	886.58
2	351.80	898.12	546.32
3	344.59	753.47	408.88
4	50.43	1569.22	1518.79
5	283.68	1108.58	824.90
6	1533.87	4407.40	2873.53
共享储能	-855.11	0	855.11

的组间 Myerson 值分支收入。可以得出在云储能系统中按照改进 Myerson 原则进行成本分摊更具公平性且满足多方共赢。

5 结论

本文提出了一种计及全生命周期成本的云储能优化配置与调度方法,采用分布式储能集合与集中式储能共享结合的模式,随后,通过 ATC 算法构建双层功率互济模型,在此基础上使用改进 Myerson 值法对系统成本进行合理分摊。通过算例仿真,得出结论如下。

1) 本文所提分布式储能集合与集中式储能共享的云储能模式,可以有效发挥规模效应,降低系统成本并促进清洁能源消纳。

2) 通过构建计及全生命周期成本的 ATC 双层优化模型,兼顾用户的用能经济性和共享储能的运营效益,提高储能投资利用率。

3) 基于改进 Myerson 值法的成本分摊,体现了公平合理性。对于电力系统发展中出现的“非全图”系统具有实际应用价值。

参考文献:

- [1] 赵一男,宋斌,钱振宇,等.未来配电网的分布式形态及规划方法[J].中国电力,2022,55(4):70-77.
ZHAO Yinan, SONG Bin, QIAN Zhenyu, et al. Dispatching architecture and planning method of future distribution network[J]. Electric Power, 2022, 55(4): 70-77.
- [2] 张旭,李阳,刘晓,等.含高渗透率新能源的新型交直流储能系统的配电网规划[J].南方电网技术,2022,16(4):60-67.



- ZHANG Xu, LI Yang, LI Xiao, *et al.* Distribution network planning of new AC/DC energy storage system with high penetration new energy[J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(4): 60–67.
- [3] 周姝灿, 卢洵, 刘新苗, 等. 大容量锂电池储能电站的等值仿真方法[J]. *南方电网技术*, 2022, 16(4): 30–38.
- ZHOU Zhucan, LU Xun, LIU Xinmiao, *et al.* Equivalent simulation method for large capacity lithium battery energy storage power station[J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(4): 30–38.
- [4] 李建林, 武亦文, 王楠, 等. 吉瓦级电化学储能电站研究综述及展望[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(19): 2–14.
- LI Jianlin, WU Yiwen, WANG Nan, *et al.* Review and prospect of gigawatt-level electrochemical energy storage power station[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(19): 2–14.
- [5] 任大伟, 侯金鸣, 肖晋宇, 等. 能源电力清洁化转型中的储能关键技术探讨[J]. *高电压技术*, 2021, 47(8): 2751–2759.
- REN Dawei, HOU Jinming, XIAO Jinyu, *et al.* Exploration of key technologies for energy storage in the cleansing transformation of energy and power[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(8): 2751–2759.
- [6] 王泉, 何怡刚, 马恒瑞, 等. 面向电网辅助服务的虚拟储能电厂分布式优化控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(10): 181–188.
- WANG Xiao, HE Yigang, MA Hengrui, *et al.* Distributed optimization control method of virtual energy storage plants for power grid ancillary services[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(10): 181–188.
- [7] 林振锋, 郑常宝, 芮涛, 等. 用户侧分布式储能鲁棒博弈优化调度方法[J]. *中国电力*, 2022, 55(2): 35–43, 114.
- LIN Zhenfeng, ZHENG Changbao, RUI Tao, *et al.* Robust game optimization scheduling method for user-side distributed energy storage[J]. *Electric Power*, 2022, 55(2): 35–43, 114.
- [8] 王仕俊, 平常, 薛国斌. 考虑共享储能的社区综合能源系统协同优化研究[J]. *中国电力*, 2018, 51(8): 77–84.
- WANG Shijun, PING Chang, XUE Guobin. Synergic optimization of community energy Internet considering the shared energy storage[J]. *Electric Power*, 2018, 51(8): 77–84.
- [9] 李淋, 徐青山, 王晓晴, 等. 基于共享储能电站的工业用户日前优化经济调度[J]. *电力建设*, 2020, 41(5): 100–107.
- LI Lin, XU Qingshan, WANG Xiaoqing, *et al.* Optimal economic scheduling of industrial customers on the basis of sharing energy-storage station[J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(5): 100–107.
- [10] 刘亚锦, 代航, 刘志坚, 等. 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[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(10): 256–264.
- LIU Yajin, DAI Hang, LIU Zhijian, *et al.* Configuration and investment benefit analysis of decentralized shared energy storage for multiple types of industrial users[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(10): 256–264.
- [11] 李咸善, 陈奥博, 程杉, 等. 基于生态博弈的含云储能微电网多智能体协调优化调度[J]. *中国电力*, 2021, 54(7): 166–177.
- LI Xianshan, CHEN Aobo, CHENG Shan, *et al.* Multi-agent coordination and optimal dispatch of microgrid with CES based on ecological game[J]. *Electric Power*, 2021, 54(7): 166–177.
- [12] 张思远, 钟浩. 聚合用户储能的云储能容量配置与定价[J]. *南方电网技术*, 2022, 16(11): 9–19.
- ZHANG Siyuan, ZHONG Hao. Cloud energy storage capacity configuration for aggregated user energy storage and its transaction pricing[J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(11): 9–19.
- [13] 康重庆, 刘静琨, 张宁. 未来电力系统储能的新形态: 云储能[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(21): 2–8, 16.
- KANG Chongqing, LIU Jingkun, ZHANG Ning. A new form of energy storage in future power system: cloud energy storage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(21): 2–8, 16.
- [14] 刘静琨, 张宁, 康重庆. 电力系统云储能研究框架与基础模型[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(12): 3361–3371, 3663.
- LIU Jingkun, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Research framework and basic models for cloud energy storage in power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(12): 3361–3371, 3663.
- [15] 李咸善, 方子健, 李飞, 等. 含多微电网租赁共享储能的配电网博弈优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(18): 6611–6625.
- LI Xianshan, FANG Zijian, LI Fei, *et al.* Game optimal scheduling of distribution network with multi-microgrid leasing and shared energy storage[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(18): 6611–6625.
- [16] 陈岑, 武传涛, 康慨, 等. 基于改进 Owen 值法的分布式储能双层合作博弈优化策略[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(11): 3924–3936.
- CHEN Cen, WU Chuantao, KANG Kai, *et al.* Optimal strategy of distributed energy storage two-layer cooperative game based on improved owen-value method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(11): 3924–3936.
- [17] 陈思源. 合作博弈 Shapley 值的扩展与应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- CHEN Siyuan. The extension and application of Shapley value in the cooperative game[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [18] CUI S C, WANG Y W, SHI Y, *et al.* An efficient peer-to-peer energy-sharing framework for numerous community prosumers[J].



- IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(12): 7402–7412.
- [19] ZENG A D, XU Q S, DING M S, *et al.* A classification control strategy for energy storage system in microgrid[J]. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2015, 10(4): 396–403.
- [20] 谢雨龙, 罗逸飏, 李智威, 等. 考虑微网新能源经济消纳的共享储能优化配置[J]. *高电压技术*, 2022, 48(11): 4403–4413.
- XIE Yulong, LUO Yiyang, LI Zhiwei, *et al.* Optimal allocation of shared energy storage considering the economic consumption of new energy in microgrid[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(11): 4403–4413.
- [21] 吴盛军, 刘建坤, 周前, 等. 考虑储能电站服务的冷热电多微网系统优化经济调度[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(10): 10–18.
- WU Shengjun, LIU Jiankun, ZHOU Qian, *et al.* Optimal economic scheduling for multi-microgrid system with combined cooling, heating and power considering service of energy storage station[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(10): 10–18.
- [22] 江润洲, 邱晓燕, 李丹, 等. 含储能系统的多微网智能配电系统经济运行[J]. *电网技术*, 2013, 37(12): 3596–3602.
- JIANG Runzhou, QIU Xiaoyan, LI Dan, *et al.* Economic operation of smart distribution network containing multi microgrids and energy storage system[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(12): 3596–3602.
- [23] 温可瑞, 李卫东, 韩松, 等. 考虑日历寿命的电池储能系统参与一次调频服务配置容量与控制参数协同优化[J]. *高电压技术*, 2019, 45(7): 2185–2193.
- WEN Kerui, LI Weidong, HAN Song, *et al.* Optimization of deployment with control for battery energy storage system participating in primary frequency regulation service considering its calendar life[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(7): 2185–2193.
- [24] 徐若晨, 张江涛, 刘明义, 等. 电化学储能及抽水蓄能全生命周期度电成本分析[J]. *电工电能新技术*, 2021, 40(12): 10–18.
- XU Ruochen, ZHANG Jiangtao, LIU Mingyi, *et al.* Analysis of life cycle cost of electrochemical energy storage and pumped storage[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2021, 40(12): 10–18.
- 作者简介:**
魏震波 (1978—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事电力系统安全稳定分析、电力市场和综合能源系统研究, E-mail: weizhenbo@scu.edu.cn;
李银江 (1998—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 从事储能技术及其在电力系统中的应用研究, E-mail: 745159746@qq.com。
- (责任编辑 许晓艳)

Two-Layer Optimization Operation Model of Cloud Energy Storage Based on Improved Myerson Value Method

WEI Zhenbo, LI Yinjiang, ZHANG Wenwen, YANG Chao
(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610000, China)

Abstract: To deeply explore the role of centralized shared energy storage and distributed energy storage in the future new energy structure, this paper proposes a two-layer optimization operation model of cloud energy storage considering multi-agent value coordination. Firstly, a two-layer cloud energy storage model is built based on the scale effect of shared energy storage and the complementarity of distributed energy storage users. The upper objective function is the optimal daily economic benefit considering the full lifecycle cost of shared energy storage. The lower layer aims at the lowest daily operation cost of the user alliance and is solved by two-layer parallel optimization of analytic target cascading (ATC). To take into account the interests of each participant and the realization paths, the paper puts forward an improved Myerson value method to address the curse of dimensionality caused by cost allocation and user groups of chain alliance. Finally, the simulation results show that the model can further improve the consumption capacity of clean energy in the whole society, and the proposed cost allocation method can yield win-win results, providing references for future user-side large-scale energy storage applications.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (Multi-agent Interactive Game and Hierarchical Autonomous Operation Management under Weakly-Centralized Structure of Distribution Network, No.52077146).

Keywords: cloud energy storage; new energy consumption; analytic target cascading; improved Myerson value method; cost allocation