

# 考虑用电形态相似度的多用户共享储能投资决策

刘继春<sup>1</sup>, 陈雪<sup>1</sup>, 向月<sup>1\*</sup>, 张锐锋<sup>2</sup>, 刘俊勇<sup>1</sup>

(1. 四川大学电气工程学院, 四川省 成都市 610065;

2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州省 贵阳市 550000)

## Investment Decision for Multi-user Shared Energy Storage Considering Similarity of Daily Load Profile

LIU Jichun<sup>1</sup>, CHEN Xue<sup>1</sup>, XIANG Yue<sup>1\*</sup>, ZHANG Ruifeng<sup>2</sup>, LIU Junyong<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China;

2. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550000, Guizhou Province, China)

**Abstract:** As a result of the large-scale penetration of renewable energy in power grids, the utilization of energy storage (ES) devices to promote renewable energy consumption and reduce user cost has gradually become a developing trend. The economic benefits of ES on the user side were thoroughly explored, and a comprehensive benefit model of ES was established. Furthermore, an investment decision model of the shared ES capacity configuration was established. Based on similarity of daily load profile, a user selection method based on high and low similarity was proposed to improve the revenues of shared ES. An example was used to analyze and compare the revenues of ES shared by users under high and low daily load profile similarity. The shared ES capacity configuration of investment decision-making was given as a result to achieve greater shared ES economic benefits, which are positively correlated with the number of users.

**Keywords:** shared energy storage; similarity of daily load profile; investment assessment

**摘要:** 在大规模可再生能源渗透的背景下, 利用储能装置促进可再生能源消纳并降低用户成本逐渐成为发展趋势。以电能用户为研究对象, 深入挖掘并构建用户侧储能综合效益模型; 建立多用户共享储能的容量配置投资决策模型, 基于用电形态相似度, 提出了以高、低2种相似度为标准的共享储能模式下用户筛选方式, 以提高共享储能的经济效益。算例分析对比了高、低2种用电形态相似度下用户集体共享储

能的经济性, 给出了共享储能容量配置的投资决策结果, 以高用电形态相似度作为用户筛选标准可以获得更大的共享储能经济效益, 并且经济效益与用户数量呈现正相关。

**关键词:** 共享储能; 用电形态相似度; 投资分析

## 0 引言

随着可再生能源发电技术的飞速发展, 其在电力系统中的重要性日益提升。但是可再生能源发电具有明显的随机性和波动性, 导致电力系统过载和电压偏差等问题, 影响电力系统稳定性<sup>[1-2]</sup>。储能 (energy storage, ES) 由于兼具电源与负荷双重特性, 可以将电能生产与消费解耦, 既能有效解决可再生能源的反调峰特性, 也可以通过在时间尺度上转移负荷来削峰填谷、提高供电可靠性以及降低用户购电成本<sup>[3]</sup>。当前储能技术在电网侧、电源侧和用户侧都有示范应用, 其中用户侧储能占比最大<sup>[4]</sup>。但在用户侧储能的推广过程中, 由于其成本较高且市场盈利模式不明确, 造成投资回报预期不确定, 成为储能商业化发展的主要阻碍<sup>[5]</sup>。

共享储能是在共享经济快速发展的趋势下产生的新型储能投资理念, 是指多个用户共同投资运营一套储能设备<sup>[6]</sup>。目前国内外学者关于共享储能运营模式和综合效益的研究已经取得了一些成果。文献[7]提出了利用共享储能结合需求侧响应进行家庭能源管理的方式, 共享储能由社区用户和配电网运营商共同投资, 在降低用户购电成本的同时延缓配电网的投资改

基金项目: 中国电机工程学会青年人才托举项目 (CSEE-YESS-2018006)。

Young Elite Scientists Sponsorship Program by CSEE (CSEE-YESS-2018006)。

造。文献[8]提出多用户共享虚拟储能的容量配置方法,针对共享虚拟储能的运营者以及用户之间的交易建立了两阶段优化模型,优化结果显示管理者所需储能容量以及用户购电成本都明显降低。文献[9]提出基于产能用户的集成储能实现能源共享和管理的模型,通过多个产能用户共享储能进行能源的传递,使其摆脱设备调度和直接负荷控制在需求侧管理中的限制,进一步减小供需不平衡,提升用户效益。文献[10]提出了多用户共享储能的能源管理方法,通过给定利润系数优化共享储能的充放电过程,并通过算例验证了共享储能可以将用户利润提升10%。文献[11]针对社区综合能源系统,以用户集体经济性最优为目标,建立了包括光伏发电装置、热电联供以及共享储能设施在内的多用户协同优化模型。文献[12]提出发电侧共享储能机制,并建立了基于合作博弈理论的共享储能规划模型,通过实际风力发电数据检验了联盟的整体理性、参与者的个体理性和联盟的稳定性。文献[13]提出了以促进可再生能源消纳为目标的共享储能商业运营模式,并讨论了区块链技术在共享储能交易中的应用前景,为中国共享储能的发展提出了建议。

综上,当前关于共享储能的研究主要集中于不同投资主体侧共享储能经济效益的定量分析,但是未对共享储能投资效果,例如储能净效益和投资回收周期进行分析计算和评价。此外,共享储能经济性优于各用户单独配置储能的原因在于利用多个用户负荷曲线的相似性或者互补性提高储能利用率,从而在保证经济效益的同时减少投资成本,但是现有研究未对利用负荷曲线形态的相似度如何更大程度实现共享储能经济效益进行深入分析。

本文针对多用户共享储能投资决策,首先用全寿命周期分析方法建立了储能年综合效益模型和以用户集体总购电成本最低为目标函数的多用户共享储能的投资决策模型;之后提出了用电形态相似度计算方法;最后,通过算例展示了投资决策过程,比较了用户单独配置储能与共享储能的经济性,比较高相似度用户集体和低相似度用户集体的共享储能优化结果和效益。

## 1 用户侧储能综合效益评估

在源、网、荷不同安装位置 and 不同功能设计的储能系统有着不同的效益,本章构建用户侧储能装置的综合效益评估方法。

### 1.1 峰谷价差效益

对于用户来说,安装储能系统之后,利用分时电价机制,在低电价时段充电、高电价时段放电可以获得峰谷价差效益,这也是最为普遍的储能盈利方式<sup>[14]</sup>。假设一年中每天的用电曲线相同,则储能每年的峰谷价差效益具体可表示为

$$B_{EPA} = 365 \sum_{t=1}^T (P'_{dis} - P'_c) \Delta t R_t \quad (1)$$

式中:  $P'_{dis}$ 、 $P'_c$  分别为  $t$  时刻储能的放电功率和充电功率, MW;  $T$  为一天内的优化时段, h;  $\Delta t$  为时间间隔, h;  $R_t$  为  $t$  时刻电价, 元/MWh。

### 1.2 用户变压器投资效益

对于大中型用户,停电会对其造成较大的经济损失,因此为保证其供电可靠性,通常会申请安装专用配电变压器,并由其承担投资成本。安装储能装置后,储能系统可以在用电高峰时放电,降低了对电网峰值供电的需求,从而可以减小配电变压器的容量,即降低变压器投资成本,获得减少变压器投资的效益<sup>[15]</sup>,折算至年效益可表示为

$$B_{TRAN} = L_{Fn}^{tran} f_{tran} \quad (2)$$

$$\delta_y = 1 - \frac{P'_{peak,y}}{P_{peak,y}} \quad (3)$$

$$f_{tran} = (1 + \alpha) C_d \frac{\delta_y P_{peak,y}}{K \cos \varphi} \quad (4)$$

$$L_{Fn}^{tran} = \frac{d_r (1 + d_r)^{T_{tran}}}{(1 + d_r)^{T_{tran}} - 1} \quad (5)$$

式中:  $L_{Fn}^{tran}$  为变压器的资金回收系数;  $f_{tran}$  为变压器初始投资成本;  $\delta_y$  为储能削峰率;  $P_{peak,y}$ 、 $P'_{peak,y}$  分别为安装储能设备前后用户负荷峰值, MW;  $\alpha$  为变压器安装费用在设备造价中的占比;  $C_d$  为用户侧变压器单位容量造价, 元/MW;  $K$  为变压器负载率;  $\cos \varphi$  为功率因数;  $T_{tran}$  为变压器寿命周期, a;  $d_r$  为折现率。

### 1.3 减少用户停电损失效益

对于大中型用户,停电导致的损失包括2部分:停电期间造成的直接经营损失和停电造成的产品报废损失。储能装置可以作为备用电源在ms级内实现电网供电到储能供电的转换,减少瞬间停电的产品报废损失,随后还可以减少用户的经营损失,由此每年产生的经济效益可表示为<sup>[16]</sup>

$$B_{\text{IEAR}} = R_{\text{IEAR}} \lambda_s E_{\text{ENS}} [1 - p\{S_t < E_{\text{ENS}}\}] + (\lambda_s - \lambda'_s)(r_s + r_b) E_{\lambda} \quad (6)$$

$$E_{\text{ENS}} = T_s(1 - A_s)P_0 \quad (7)$$

$$p\{S_t < E_{\text{ENS}}\} = \frac{S_t \text{ 小于 } E_{\text{ENS}} \text{ 的小时数}}{24} \quad (8)$$

$$\lambda'_s = \lambda_s \lambda_b \quad (9)$$

式中： $R_{\text{IEAR}}$ 为用户的停电损失评价，元/MWh； $E_{\text{ENS}}$ 为每次停电造成的用户电量不足期望值，MWh； $T_s$ 为用户每年总用电时间，h； $A_s$ 为电网供电可靠性； $P_0$ 为用户保证正常生产所需最小供电功率，MW； $S_t$ 为 $t$ 时刻储能内的存储电量，MWh； $p\{S_t < E_{\text{ENS}}\}$ 为储能装置投入后，停电事故发生在剩余电量小于 $E_{\text{ENS}}$ 的時刻的概率； $\lambda_s$ 为未投入储能系统时的故障停电率； $\lambda'_s$ 为投入储能系统后的故障停电率； $\lambda_b$ 为储能系统的故障率； $r_s$ 、 $r_b$ 分别为市电和储能系统的修复时间，h； $E_{\lambda}$ 为停电给用户造成的损失，元/h。

#### 1.4 政府补贴效益

由于当前储能的投資成本较高，为推广储能市场的发展，政府会按储能的充电量对储能投资者进行补贴<sup>[17]</sup>，每年补贴效益可以表示为

$$B_{\text{SS}} = 365 e_{\text{SS}} \sum_{t=1}^T P'_c \Delta t \quad (10)$$

式中： $e_{\text{SS}}$ 为单位储能充电电量政府补贴，元/MWh。

综上，分布式储能为用户带来的综合经济效益可表示为

$$B_{\text{ES}} = B_{\text{EPA}} + B_{\text{TRAN}} + B_{\text{IEAR}} + B_{\text{SS}} \quad (11)$$

#### 1.5 分布式储能全寿命周期成本建模

通常投資項目的全寿命周期由设备的建设、运营和清理3个过程组成<sup>[18]</sup>，储能的全寿命周期成本则主要由初始安装成本 $C_{\text{inv}}$ 和运行维护成本 $C_{\text{OP}}$ 组成，利用资金回收系数将分布式储能寿命周期内的总成本折算至每年，具体表示为

$$C_{\text{inv}} = L_{\text{Fn}}(c_{\text{pinv}} P_{\text{max}} + c_{\text{einv}} E_{\text{rate}}) \quad (12)$$

$$C_{\text{OP}} = L_{\text{Fn}} \sum_{i=1}^{N_0} C_{\text{op},i} P_{\text{max}} \left( \frac{1+i_t}{1+d_r} \right)^i \quad (13)$$

$$L_{\text{Fn}} = \frac{d_r(1+d_r)^{N_0}}{(1+d_r)^{N_0}-1} \quad (14)$$

式中： $c_{\text{pinv}}$ 、 $c_{\text{einv}}$ 分别为储能的单位功率成本（元/MW）和单位容量成本（元/MWh）； $P_{\text{max}}$ 、 $E_{\text{rate}}$ 分别为

储能的最高充放电功率（MW）和额定容量（MWh）； $C_{\text{op},i}$ 为储能第 $i$ 年的单位运行维护成本，元/MWh； $i_t$ 为通货膨胀率； $L_{\text{Fn}}$ 表示资金回收系数； $N_0$ 为储能实际运行寿命，a。

因此分布式储能的全寿命周期成本可表示为

$$L_{\text{CC}} = C_{\text{inv}} + C_{\text{OP}} \quad (15)$$

综上，分布式储能在用户侧产生的综合经济效益减去其投資成本，即为利润，以一年为优化周期，可以表示为

$$B = B_{\text{ES}} - L_{\text{CC}} \quad (16)$$

## 2 多用户共享储能投资决策模型

用户侧分布式储能综合效益评估是多用户共享储能容量配置过程的主要环节，其利润最大也是共享储能优化模型的目标函数。多用户共享储能的应用模式是储能商业化发展的新方向<sup>[19-20]</sup>。利用不同用户负荷曲线的差异性或相似性，共同投資运营分布式储能装置既可以降低单个用户的投資压力，也可以提高储能装置利用率。共享储能是指对于尚未配置储能装置的用户，多个用户共同投資运营一个储能系统<sup>[21]</sup>。

### 2.1 共享储能容量配置模型

多用户共享储能的目的在于，获得相较于单用户配置储能更大的经济效益，同时减轻初期投資压力，共享储能的容量配置模型以多用户的总购电成本最低为目标函数，容量配置模型具体表示为

$$\min F = \min \sum_{i=1}^M (C_{\text{buy}}^i - B) \quad (17)$$

$$C_{\text{buy}}^i = 365 \sum_{t=1}^T R_t P'_{\text{grid},i} \Delta t \quad (18)$$

式中： $M$ 为用户总数量； $C_{\text{buy}}^i$ 为用户 $i$ 从电网购电的年費用，元； $P'_{\text{grid},i}$ 为用户 $i$ 在 $t$ 時刻的电网购电功率，MW。

### 2.2 优化模型约束条件

优化模型的约束条件包括储能荷电状态（state of charge, SOC）约束、充放电功率约束、电量连续约束、电量平衡约束和用户购电成本约束。

#### 1) SOC约束

$$S_{\text{OC}t} = \frac{S_t}{E_{\text{rate}}} \quad (19)$$

$$S_{\text{OCmin}} \leq S_{\text{OC}t} \leq S_{\text{OCmax}} \quad (20)$$

式中： $S_{\text{OC}t}$ 为 $t$ 時刻储能荷电状态值； $S_{\text{OCmin}}$ 和 $S_{\text{OCmax}}$ 分别

为储能最小荷电状态水平和最大荷电状态水平； $S_t$ 为 $t$ 时刻储能的剩余电量，MWh。

2) 共享储能充放电功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_c^t \leq P_{\max} \\ 0 \leq P_{\text{dis}}^t \leq P_{\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中： $P_{\max}$ 为储能最大充放电功率。

3) 用户使用共享储能充放电约束

$$\begin{cases} P_c^t = \sum_{i=1}^M P_{c,i}^t \\ P_{\text{dis}}^t = \sum_{i=1}^M P_{\text{dis},i}^t \end{cases} \quad (22)$$

式中： $P_{c,i}^t$ 和 $P_{\text{dis},i}^t$ 分别为用户 $i$ 在 $t$ 时刻向共享储能充、放电功率，MW。

4) 电量连续约束

$$S_t = S_{t-1} + P_c^{t-1} \eta_c \Delta t - \frac{P_{\text{dis}}^{t-1} \Delta t}{\eta_{\text{dis}}} \quad (23)$$

式中： $\eta_c$ 和 $\eta_{\text{dis}}$ 分别为储能的充、放电效率。

5) 电量平衡约束

$$\sum_{i=1}^M P_{L,i}^t = \sum_{i=1}^M (P_{\text{grid},i}^t + P_{\text{dis},i}^t + P_{\text{PV},i}^t - P_{c,i}^t) \quad (24)$$

式中： $P_{L,i}^t$ 和 $P_{\text{PV},i}^t$ 分别为用户 $i$ 在 $t$ 时刻的负荷值和用户自装的新能源出力，本文考虑光伏发电出力。

6) 用户购电成本约束

$$C_{\text{buy}}^i < C_{\text{buy}0}^i \quad (25)$$

式中： $C_{\text{buy}0}^i$ 和 $C_{\text{buy}}^i$ 分别为用户 $i$ 参与共享储能前后购电成本，元。

### 2.3 共享储能供需分配过程

在共享储能运行过程中，根据各个用户自身对共享储能的供需得到每个时刻共享储能对应的总供需：

$$\begin{cases} D_{\text{total},t} = \sum_{i=1}^M P_{c0,i}^t \Delta t \\ S_{\text{total},t} = \sum_{i=1}^M P_{\text{dis}0,i}^t \Delta t \end{cases} \quad (26)$$

式中： $D_{\text{total},t}$ 和 $S_{\text{total},t}$ 分别为 $t$ 时刻共享储能电量总需求和总供给； $P_{c0,i}^t$ 和 $P_{\text{dis}0,i}^t$ 分别为用户 $i$ 在 $t$ 时刻对共享储能的供给和需求意愿。

为保证公平性，按照比例进行供需匹配。首先定义 $t$ 时刻的供需比为

$$\mu_t = \frac{S_{\text{total},t}}{D_{\text{total},t}(1 + \eta_{\text{loss}})} \quad (27)$$

式中： $\eta_{\text{loss}}$ 为网损率。

根据供需比的不同，共享储能的供需匹配可分为2种情况。

1)  $\mu_t < 1$ ，储能的供给全部执行，而各参与者的需求按供需比满足，即

$$\begin{cases} P_{c,i}^t = P_{c0,i}^t \mu_t \\ P_{\text{dis},i}^t = P_{\text{dis}0,i}^t \end{cases} \quad (28)$$

2)  $\mu_t \geq 1$ ，储能的需求全部被满足，而各参与者的储能供给则按照其上报的供给量的 $\frac{1}{\mu_t}$ 执行，即

$$\begin{cases} P_{c,i}^t = P_{c0,i}^t \\ P_{\text{dis},i}^t = P_{\text{dis}0,i}^t / \mu_t \end{cases} \quad (29)$$

式中： $P_{c,i}^t$ 和 $P_{\text{dis},i}^t$ 分别是用户 $i$ 实际对共享储能的供给和需求。

### 3 用电形态相似度计算及用户筛选

本文在共享储能优化过程中加入用户筛选阶段，通过建立用电形态相似度模型，衡量不同用户之间负荷曲线的相似程度。

相似度较高，表示用户拥有较为类似的充放电需求，可以在特定时段内对储能进行更大程度的充放电，控制充放电次数。其缺点在于，负荷曲线相似的用户构成共享集体会使整体负荷峰谷差值更为明显，可能会限制储能针对负荷的时移作用。用电形态相似度较低的用户构成集体，可以增加储能的充放电次数，提高其利用率。其缺点在于频繁充放电会损耗储能寿命，从而影响其经济效益<sup>[22-23]</sup>。由于用户的每日负荷随机性和波动性较大，因此选择用户年平均日负荷曲线进行计算<sup>[24]</sup>，算例部分将针对2种方式进行详细比较。

斜率关联度是以曲线斜率为基础定义的一种关联度分析方法<sup>[25]</sup>，通过计算2条曲线之间的斜率关联度可以得出其相似度 $\gamma \in (0,1)$ 。以用户 $i$ 与用户 $j$ 为例，其负荷曲线 $P_{L,i}^t$ 与 $P_{L,j}^t$ 在每个时刻的关联度函数 $\zeta(t)$ 可以表示为

$$\zeta(t) = \frac{1}{1 + \left| \frac{1}{\sigma_i} \frac{\Delta P_{L,i}^t(t)}{\Delta t} - \frac{1}{\sigma_j} \frac{\Delta P_{L,j}^t(t)}{\Delta t} \right|} \quad (30)$$

$$\begin{cases} \sigma_i = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [P_{L,i}^t(t) - P_{L,i}^t(t)]^2} \\ \sigma_j = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [P_{L,j}^t(t) - P_{L,j}^t(t)]^2} \end{cases} \quad (31)$$

式中： $\sigma_i$ 、 $\sigma_j$ 分别为用户*i*和用户*j*的负荷标准差； $P_{L,av}^i(t)$ 、 $P_{L,av}^j(t)$ 分别为用户*i*和用户*j*的平均负荷。简化后，可得：

$$\zeta(t) = \frac{1}{1 + \left| \frac{\Delta P_L^i(t)}{\sigma_i} - \frac{\Delta P_L^j(t)}{\sigma_j} \right|} \quad (32)$$

则用户*i*与用户*j*的日平均用电形态相似度可以表示为

$$\gamma = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \zeta(t) \quad (33)$$

完成相似度计算后，根据所需用户数量选择相似度较高或较低的用户进行共享储能的优化配置。

## 4 算例分析

### 4.1 基础数据

以1 a作为分布式储能效益的计算周期，优化时段*T*取24 h作为储能充放电优化的周期。本文选取8个用户作为分析对象，其负荷曲线如附录图A1所示。分时电价机制中峰时段为8:00~12:00，18:00~21:00；平时段为12:00~17:00，21:00~24:00；剩余时段为谷时段。3个时段的购电价格分别为1069.7元/MWh、641.8元/MWh和313.9元/MWh<sup>[16]</sup>。变压器负载率为0.75，功率因数为0.85，变压器单位造价100万元/MW，寿命为20年<sup>[26]</sup>；网损率为8%；每个用户配置有3 MW的光伏装置，其发电曲线如附录图A2所示，储能参数如附录表A1所示<sup>[26]</sup>，其他参数如附录表A2所示<sup>[16]</sup>。

### 4.2 用户用电形态相似度计算与筛选

#### 1) 筛选用电形态相似度较高的用户

以用户1为基准，分别计算其与另外7个用户在各时刻的用电形态相似度，结果如图1所示。用户1与其余7个用户的平均相似度分别为0.972、0.964、0.948、0.933、0.932、0.931和0.926，本文选择4个用户参与共享储能，因此按照相似度从高到低，选择用户1、2、3和4进一步详细分析。

#### 2) 筛选相似度较低的用户

从上文可知，与用户1相似度最低的为用户8，以用户8为基准，分别计算其与用户2至7的相似度，其平均相似度分别为0.924、0.901、0.941、0.954、0.968和0.962，因此选择相似度最低的用户3。再计算用户3与用户2、用户4至7的相似度，其平均相似度分别为0.957、0.918、0.902、0.904和0.903，因此选择相似度

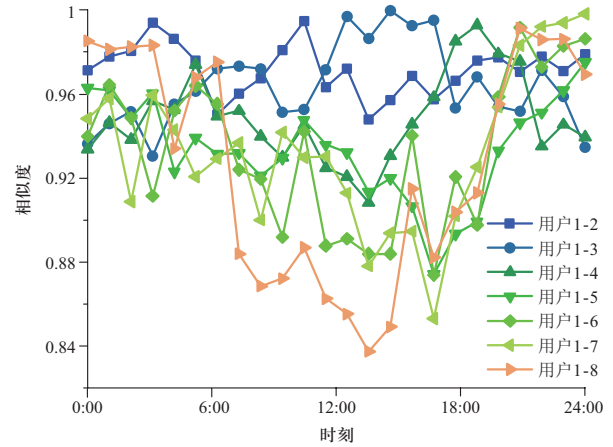


图1 用户1与其余用户的用电形态相似度

Fig. 1 Similarity of daily load profile of user 1 with other users

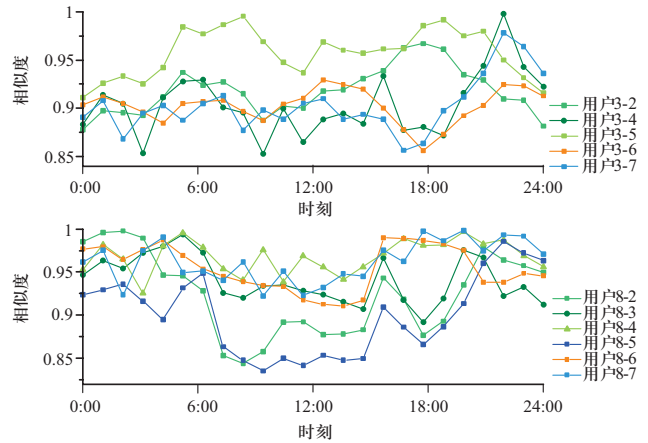


图2 用户8和用户3与其他用户的用电形态相似度

Fig. 2 Similarity of daily load profile of user 8, user 3 with other users

最低的用户5。综上，用电形态相似度较低的用户集合由用户1、3、5、8组成。用户8和用户3与其他用户在各时刻的相似度如图2所示。

### 4.3 各用户单独配置储能优化结果

为对比共享储能经济性，首先对各个用户单独配置储能的结果进行分析。在LINGO中运行优化程序后，6个用户单独配置储能的优化结果如表1所示，安装储能装置后，以用户1至4为例，储能充放电作用下净负荷曲线如图3所示，储能各项经济效益如图4所示。

从表1可以看出，用户1至用户4的储能初始投资成本平均占据自身购电成本的8.94%。个别用户储能配置功率大于配置的光伏装置，因为储能并非只用于促进光伏消纳，还要通过低储高发减少用户外部购电

成本。从图3和附录图1可以看出,用户负荷曲线的波动基本与电价的波动趋势一致,在12:00和20:00存在2个明显波峰,配置储能之后,负荷峰值降低,对应负荷谷值升高,储能在6个用户侧的削峰率平均达到6.01%。

表1 储能优化结果

Table 1 Optimization results of ES configuration

用户编号	储能容量及额定功率 /MWh, MW	初始投资成本 /百万元	原年购电成本 /百万元	现年购电成本 /百万元	回收周期 /a
1	4.32/2.05	12.56	152.65	147.33	3.04
2	3.44/1.05	9.77	153.22	146.97	4.53
3	4.05/1.34	11.63	136.77	132.11	2.87
4	8.25/4.27	21.96	173.42	166.98	2.16
5	2.01/1.09	7.09	184.19	179.67	1.57
8	5.71/2.31	15.72	190.44	184.57	2.68

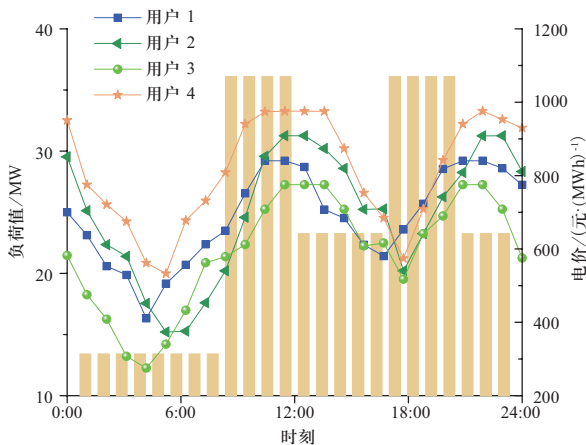


图3 配置储能后的负荷曲线和电价

Fig. 3 Daily load profiles and prices after configuration of ES

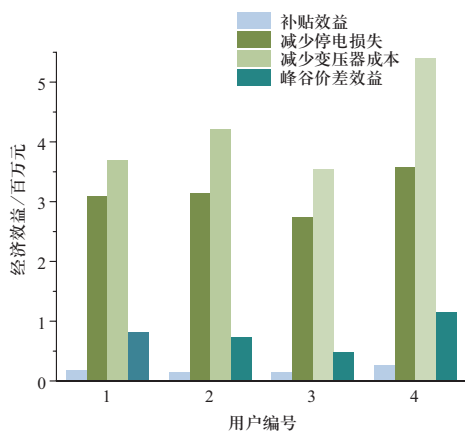


图4 用户1至4单独配置储能的经济效益

Fig. 4 Revenues with respective ES configuration from user 1 to 4

从图4可以看出,储能在用户侧产生的经济效益主要为减少用户停电损失和减少用户的变压器投资成本,平均分别为334万元/a和371万元/a,其次为峰谷价差效益,最后为补贴效益。最终用户的购电成本平均可以减少551万元/a,下降3.37%,并且均可以在储能寿命周期内收回成本,平均回收周期为2.81 a。

#### 4.4 用电形态相似度较高的多用户共享储能配置结果

4.2节中已经确定用电形态相似度较高的用户集合为用户1至4,以用户1为例,分别考虑用户1和2共享储能、用户1至3共享储能以及4个用户共享储能的运营模式,对比分析参与共享储能的户数对共享储能优化结果的影响。

3种共享储能模式的优化结果如表2所示,表中各项效益及成本为优化后用户1的结果,不同模式储能成本及效益变化趋势如图5所示。

单个用户所需承担的初始投资成本不断下降,储能的回收周期也持续缩短,每种共享模式下储能的回收周期皆小于单独配置时的结果。当用户1至3参与共享储能,投资成本降低49.92%,且回收周期也由原来的2.81 a减少至0.69 a;当4个用户都参与时,投资成本降低了67.44%,仅需0.4 a即可收回成本。

表2 用电形态相似度较高的用户集合共享储能优化结果

Table 2 Optimization results of shared ES for user groups with high similarity in daily load profile

参与者	储能容量及额定功率 /MWh, MW	购电成本 /百万元	初始投资成本 /百万元	投资成本下降比例/%	回收周期 /a
用户1	4.32/2.05	147.33	12.56	0	3.04
用户1和2	5.31/3.82	146.56	9.31	25.88	1.26
用户1至3	6.32/3.68	144.38	6.29	49.92	0.69
用户1至4	6.87/3.83	141.59	4.09	67.44	0.4

从图5可以看出,用户1所需承担的储能初始投资成本随着共享储能参与者的增多迅速下降,经济效益总体处于上升状态,其中减少停电损失效益增长最为明显,当4个用户共享储能时,用户1分配得到的减少停电损失效益由单独配置时的308万元增至501万元;减少的变压器投资成本也在持续上升,第4种模式下其值达到476万元,相较于最初增加了28.7%。补贴

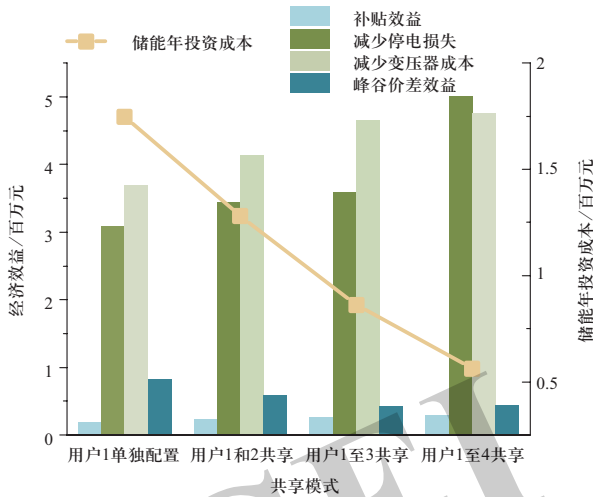


图5 不同共享模式下储能成本及效益

Fig. 5 Costs and revenues of ES from different sharing proposals

效益由于在总效益中占比较小, 4种模式下变化幅度不大; 峰谷价差效益则是唯一出现下降趋势的经济效益, 原因在于用户在共享储能中分配得到的容量相较于单独配置的总容量较小, 充放电过程主要应用于减小负荷峰值以获得减少停电损失效益和减少变压器投资成本。

#### 4.5 用电形态相似度较低的多用户共享储能配置结果

4.2节中已经确定用电形态相似度较低的用户集合为用户1、3、5、8, 以用户1为例, 对比分析用户1和3共享储能、用户1、3、5共享储能以及4个用户共享储能的优化结果, 具体如表3所示, 表中各项效益及成本为分配后用户1的结果。

表3 用电形态相似度较低的用户集合共享储能优化结果  
Table 3 Optimization results of shared ES for user groups with low similarity in daily load profile

参与者	储能容量及额定功率 /MWh, MW	购电成本 /百万元	初始投资成本 /百万元	投资成本下降比例/%	回收周期 /a
用户1	4.32/1.56	147.33	12.56	0	3.04
用户1和3	5.89/1.16	149.25	8.15	35.12	2.48
用户1、3、5	8.86/3.99	147.75	9.07	27.79	2.06
用户1、3、5、8	10.25/4.71	148.21	10.06	19.91	1.9

从表3可以看出, 随着共享储能集体用户数的增多, 储能配置容量不断上升, 第4种模式下需要配置10.25 MWh的储能, 单独配置时4个用户则共需要16.1 MWh; 储能回收周期则呈现下降趋势, 第4种模式下, 共享储能在1.9 a收回成本, 相较于单独配置时的平均回收周期2.54 a下降了25%。此外, 共享模式下, 用户所需承担的投资成本也都小于单独配置时的结果, 当用户1和3共享储能时, 用户1承担的投资成本下降了35.12%, 但是下降比例的变化趋势与表2相反, 与共享储能参与者数量呈现负相关, 原因在于储能总容量增速较快, 并且在相同用户数下, 储能容量均大于表2的结果。

对于相似度较低的用户集合, 虽然共享模式下单个用户所需投资成本降低, 且购电成本相较于安装储能前下降, 但是下降幅度均小于单独配置储能的模式, 第4种模式下, 储能投资成本下降了19.91%, 用户1的年购电成本却由单独配置储能时的14 733万元增至14 821万元。可见, 以低用电形态相似度筛选用户时, 共享模式的优势主要是降低用户投资成本, 但是用户购电成本下降幅度受限。

#### 4.6 算例小结

综合4.4节和4.5节的结果, 共享模式可以有效降低用户购电成本和储能投资成本, 同时大幅缩短储能的回收周期。单独配置储能时, 投资回收周期平均为2.81年, 购电成本下降比例平均为3.37%。共享模式下, 对于相似度较高的集体, 用户购电成本平均可以下降8.25%, 相较于单独配置储能, 其所需投资成本可以下降67.44%, 并且回收周期仅为0.4年; 对于相似度较低的集体, 储能投资成本的降幅达19.56%, 回收周期为1.9年。

对于本算例安装有MW级分布式光伏的用户, 储能投资收益主要来源于降低变压器投资、减少停电损失、峰谷电价差效益等方面, 每个分项效益值与算例设置的场景参数密切相关。对于相似度较高的用户集体, 由于对储能需求产生共振效应, 与相似度较低的用户集体相比, 储能设备充放电次数较少, 充放电深度较高, 运营效益更大、回收周期更短, 具体程度与场景参数设置有关, 本算例中前者储能设备每天充放电次数为8次, 平均充放电深度达到0.6, 而后者每天充放电次数为13次, 平均充放电深度达到0.4。

## 5 结论

1) 用户安装储能的投资收益不仅要计入峰谷电价差带来的购电成本降低, 还要综合考虑变压器容量投资减少、用电可靠性提升的效益。而在共享模式下, 随着共享储能用户数的增多, 储能配置容量的投资额呈现上升趋势, 但由于共享模式高效利用了储能装置的充放电能力, 其投资总额将明显低于每个用户单独配置储能容量的投资额之和, 单个用户承担的储能投资成本大幅降低。

2) 相较于用户单独配置储能, 共享模式下的用户购电成本下降幅度增大, 储能成本回收周期缩短。

3) 高用电形态相似度用户共享储能相较于低相似度用户, 在用户数相同的情况下, 储能投资成本的下降幅度和共享储能的经济效益更大, 回收周期更短。

4) 本文下一步将导入更多的实际场景数据进行测算, 使多用户共享储能投资决策模型更加精细化、实用化。

## 参考文献

- [1] 张雅君, 顾承红, 李芙蓉. 考虑过网费及可再生能源不确定性的最优局域电力交易策略[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(5): 461-468.  
ZHANG Yajun, GU Chenghong, LI Furong. Optimal strategy for local energy trading considering network charges and renewable uncertainties[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(5): 461-468(in Chinese).
- [2] 杨立兵, 张汀荟, 李雅超, 等. 基于配额制的可再生能源电力交易系统动力学仿真[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(5): 497-507.  
YANG Libing, ZHANG Tinghui, LI Yachao, et al. System dynamics simulation of renewable energy power trading based on renewable portfolio standard[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(5): 497-507(in Chinese).
- [3] 吴小刚, 刘宗歧, 田立亭, 等. 独立光伏系统光储容量优化配置方法[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1271-1276.  
WU Xiaogang, LIU Zongqi, TIAN Liting, et al. Optimized capacity configuration of photovoltaic generation and energy storage device for stand-alone photovoltaic generation system[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1271-1276(in Chinese).
- [4] 丁逸行, 徐青山, 吕亚娟, 等. 考虑需量管理的用户侧储能优化配置[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1179-1186.  
DING Yixing, XU Qingshan, LÜ Yajuan, et al. Optimal configuration of user-side energy storage considering power demand management[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1179-1186(in Chinese).
- [5] International Renewable Energy Agency. Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030[R]. Abu Dhabi: IRENA, 2017.
- [6] LIU J K, ZHANG N, KANG C Q, et al. Decision-making models for the participants in cloud energy storage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 5512-5521.
- [7] WANG Z M, GU C H, LI F R, et al. Active demand response using shared energy storage for household energy management[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 1888-1897.
- [8] ZHAO D W, WANG H, HUANG J W, et al. Virtual energy storage sharing and capacity allocation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1112-1123.
- [9] ANZAR Mahmood, ASIF Raza Butt, USMAN Mussadiq, et al. Energy sharing and management for prosumers in smart grid with integration of storage system[C]//2017 5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair (ICSG).
- [10] KATAYOUN Rahbar, MOHAMMAD R, VEDADY Moghadam, et al. Shared energy storage management for renewable energy integration in smart grid[C]// 2016 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2016. Minneapolis.
- [11] 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(in Chinese).
- [12] 孙偲, 陈来军, 邱欣杰, 等. 基于合作博弈的发电侧共享储能规划模型[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(4): 360-366.  
SUN Cai, CHEN Laijun, QIU Xinjie, et al. A generation-side shared energy storage planning model based on cooperative game[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(4): 360-366(in Chinese).
- [13] 董凌, 年珩, 范越, 等. 能源互联网背景下共享储能的商业模式探索与实践[J]. 电力建设, 2020, 41(4): 38-44.  
DONG Ling, NIAN Heng, FAN Yue, et al. Exploration and practice of business model of shared energy storage in energy Internet[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(4): 38-44(in Chinese).
- [14] 吴传申, 刘宇, 高山, 等. 基于预测控制的储能系统多时间尺度动态响应优化研究[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(3): 222-230.  
WU Chuanshen, LIU Yu, GAO Shan, et al. Multi-time scale dynamic response optimization of energy storage system based on predictive control[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 222-230(in Chinese).
- [15] 樊高松. 用户侧储能装置运行策略优化及经济性分析 [D]. 广西: 广西大学, 2015.
- [16] 颜志敏. 智能电网中蓄电池储能的价值评估研究 [D]. 上海:



上海交通大学, 2012.

[17] 苏州工业园区管理委员会. 苏州工业园区绿色发展专项引导资金管理暂行办法 (苏园管规字[2019]1号) [EB/OL]. (2019-03-24) [2020-08-06]. [http://public.sipac.gov.cn/gkml/gbm/gwgh/201905/t20190516\\_1024475.htm](http://public.sipac.gov.cn/gkml/gbm/gwgh/201905/t20190516_1024475.htm).

[18] 帅军庆. 电力企业资产全寿命周期管理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[19] 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(in Chinese).

[20] KALATHIL D, WU C Y, POOLLA K, et al. The sharing economy for the electricity storage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 556-567.

[21] CHAKRABORTY P, BAEYENS E, POOLLA K, et al. Sharing storage in a smart grid: a coalitional game approach[EB/OL]. 2017. <https://arxiv.org/abs/1712.02909>.

[22] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 91-97. HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 91-97(in Chinese).

[23] 颜宁, 李相俊, 张博, 等. 基于电池健康度的微电网群梯次利用储能系统容量配置方法[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1630-1638. YAN Ning, LI Xiangjun, ZHANG Bo, et al. Energy storage capacity allocation method with cascade utilization based on battery health in microgrids[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1630-1638(in Chinese).

[24] 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): 4245-4254. 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): 4245-4254(in Chinese).

[25] 刘文霞, 何向刚, 吴方权, 等. 基于风电-负荷匹配度提高风电消纳能力[J]. 智慧电力, 2018, 46(1): 28-32. LIU Wenxia, HE Xianggang, WU Fangquan, et al. Wind power accommodation capability improvement based on wind power-load matching degree[J]. Smart Power, 2018, 46(1): 28-32(in Chinese).

[26] 向育鹏, 卫志农, 孙国强, 等. 基于全寿命周期成本的配电网蓄电池储能系统的优化配置[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 264-270. XIANG Yupeng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Life cycle cost based optimal configuration of battery energy storage system in distribution network[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 264-270(in Chinese).

### 附录A

表 A1 储能系统参数

Table A1 Parameters of energy storage system

类别	$c_{pinv} / (\text{元} \cdot \text{MW}^{-1})$	$c_{einv} / (\text{元} \cdot (\text{MWh})^{-1})$	$C_{op} / (\text{元} \cdot (\text{MWh})^{-1})$	$\eta_c$	$\eta_{dis}$	No/a
Li-ion	2 234 000	1 173 000	97 000	0.9	0.9	15

表 A2 其他参数

Table A2 Other parameters

$r_s$	$r_b$	$i_r$	$\cos \varphi$	$C_d$
6 h	12 h	1.5%	0.85	100万元/MW
$T_{tran}$	$K$	$\alpha$	$E_{ENS}$	$A_s$
20 a	75%	10%	27.216 MWh	99.973%
$P_0$	$\lambda_b$	$E_\lambda$	$e_{ss}$	$R_{IEAR}$
12.6 MW	0.101%	45万元/h	0.1元/kWh	15万元/MWh
	$d_r$	$\lambda_s$	$T_s$	
	4.5%	0.093%	8 000 h	

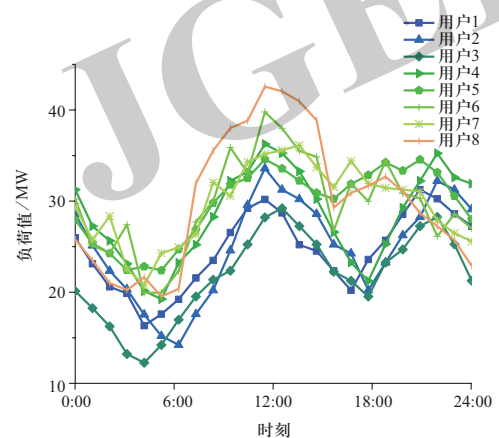


图 A1 用户负荷曲线

Fig. A1 Daily load profiles of users

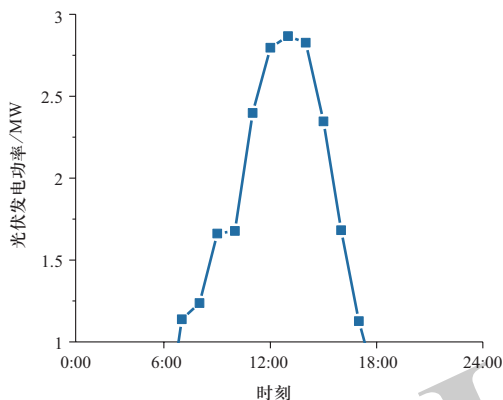


图 A2 光伏出力曲线  
Fig. A2 Power curve of PV

收稿日期：2020-08-06；修回日期：2020-11-06。



刘继春

作者简介：

刘继春（1975），男，博士，教授，博士生导师，IEEE高级会员，研究方向为电力系统经济性分析及电力市场，E-mail: jichunliu@scu.edu.cn。

陈雪（1997），女，硕士研究生，研究方向为电力市场与分布式储能投资分析，E-mail: 1300251575@qq.com。

向月（1987），男，博士，副教授，研究方为电力系统规划与优化运行。通信作者，E-mail: xiang@scu.edu.cn。

刘俊勇（1963），男，博士，教授，博士生导师，研究方向为电力市场与电力系统稳定与控制，E-mail: liujy@scu.edu.cn。

（责任编辑 张宇）

## 《全球能源互联网》2018—2020 出版专题

时间	专题名称	特约主编
2018-05	全球能源互联网工程规划与技术经济	张运洲
2018-07	大规模储能技术	梅生伟
2018-09	特 / 超高压直流输电技术	汤广福
2019-01	高比例可再生能源未来电力系统	鲁宗相
2019-03	海上风电	姚良忠 蔡旭
2019-05	面向低碳的新一代电力能源系统	康重庆
2019-07	清洁能源集成系统规划与商业模式	梅生伟 贾宏杰
2019-09	能源战略与能源互联网（第1辑）	孙宏斌 郭庆来
2020-01	世界能源转型战略及关键技术	
2020-03	柔性直流输电及大规模新能源并网	徐政 郭贤珊
2020-07	电力系统低碳发展的目标、战略及技术选择	赵俊华 张宁 黄杰
2020-09	电力市场促进可再生能源发展	陈启鑫 荆朝霞
2020-11	能源战略与能源互联网（第2辑）	孙宏斌 郭庆来 卫志农

扫码查看已出版专题导读

