基于全寿命周期的共享储能优化配置及经济性研究

段双明[1]，郑羽翊[1]，李军徽[1]，赵志强[2]，刘浩军[2]

（1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室（东北电力大学）吉林 吉林 132012；
2. 国网哈密供电公司，新疆 哈密 839000）

摘要：随着储能技术与共享经济逐渐成熟，共享储能商业模式也逐渐普及并应用于实际情况中。然而，共享储能电站具体收益等相关问题尚不明确，这也限制了该商业模式在规模化应用中的进一步推广。提出考虑新能源消纳的共享储能电站优化运行方法，建立考虑全寿命周期的共享储能电站成本模型并分析储能效益来源；将全寿命周期内共享储能成本进行等年值转换分析，以其在典型日调度时间内净收益最大为目标建立模型；采用改进黏菌优化算法对共享储能电站容量配置、充放电行为以及运行状态寻找最优解。算例分析显示，用该方法配置共享储能后，共享储能电站所需容量成本较各用户配置分散式储能电站下降 29.49%，当共享储能服务商将服务费设定为 0.238 元 /(kW·h) 时，可在 8 年内收回投资成本。

关键词：共享储能；新能源消纳；微电网；改进黏菌算法；全寿命周期

Research on optimized allocation and economy of shared energy storage based on whole life cycle

DUAN Shuangming[1], ZHENG Yuyi[1], LI Junhui[1], ZHAO Zhiqiang[2], LIU Haojun[2]

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. State Grid Hami Power Supply Company, Hami 839000, China)

Abstract: With the gradual maturation of energy storage technology and the sharing economy, the shared energy storage business model has been gradually popularized and applied in practical situations. However, the specific revenue and other related issues of shared energy storage power plant are still unclear, which limits the further promotion of this business model in large-scale application. This paper proposes an optimization method of shared energy storage power plant operation considering new energy consumption, establishes a shared energy storage power plant cost model considering the whole life cycle and analyzes the sources of energy storage benefits; the cost of shared energy storage in the whole life cycle is converted into the same annual value analysis, and the model is established with the goal of maximizing the net benefit during the typical daily dispatch time; the improved slime mold optimization algorithm is used to solve the capacity configuration, charging and discharging behavior, and operation state of the shared energy storage power plant, Example analysis shows that, after configuring shared energy storage with this method, the capacity cost of shared energy storage power station is 29.49% lower than that of decentralized energy storage power station configured by each user, and the investment cost can be recovered in 8 years when the service fee of the shared energy storage service provider is set to 0.238 Yuan/(kW-h).

Keywords: shared energy storage; new energy consumption; microgrids; improved slime mold algorithm; whole life cycle

---

新疆自治区重点研发任务专项项目（2022B01019-1）

0 引言

在“碳达峰、碳中和”及能源清洁化转型的背景下，我国能源正由高碳向低碳转型，新能源已成为新型电力系统的主体，但其波动性和随机性使得储能系统变得必不可少。然而，传统储能电站成本高、资源利用率低，难以实现效益最大化，商业化进程缓慢[1-4]。

当前，共享经济模式被广泛应用于电力领域，电力共享理念已然成为行业新热点。在电力共享领域中，通过共享电力实现能源的高效利用，积极探索可再生能源领域的发展路径，大力推广绿色能源，有效解决电力资源的需求与供给矛盾。因此，在全球范围内的电网运营中，共享储能模式成为一种受到越来越多关注的研究方向。文献[5]提出了基于共享理念的多区域电-储运营模式，分别建立了运营商和用户的效益模型，并对该模式下的各种因素进行了灵敏度分析。文献[6]将共享储能与区块链技术结合，提出了一种交易优化模型，为共享储能的应用前景提供了新思路。文献[7]将分布式储能应用于城市楼宇集群，提出了具有共享化理念的储能资源合作博弈模型，为储能容量共享机制提供参考。文献[8]考虑了多区域综合能源系统与共享储能系统的配置，提出了一种双层优化运行策略。上述文献针对共享储能运营模式以及应用场景进行了研究，但并未考虑共享储能对新能源有效消纳方面相关的问题。

目前，也有针对储能参与微电网新能源消纳相关问题进行的研究。文献[9]基于纳什谈判理论，构建了一种多微电网与共享储能之间的合作运行谈判模型。文献[10]通过建立含共享储能的多种能量形式微电网模型，基于分布鲁棒优化理论，有效提升了系统的经济性和灵活性。参考文献[11]利用非合作博弈理论来优化各微电网的储能容量和能源采购方案，从而实现各微电网的经济调度，进而有效地降低了系统的运行费用。文献[12]提出了一种基于分布式发电场景下的不确定性问题的储能容量优化配置方法，以期达到最小化储能容量的配置目标。文献[13]采用双层规划方法，将共享储能和虚拟电厂结合，提出了可行的共享储能配置方案并促进了可再生能源的消纳。文献[14]通过考虑退役电池的梯次利用来降低储能的成本，以微电网系统运行收益最大作为共享储能系统优化配置的目标函数。而储能的技术特征以及寿命周期等参数均可直接对储能效益产生影响，上述文献未对投资回报等相关经济问题进行研究。

针对现有工作的不足，本文基于全寿命周期的共享储能电站系统进行建模，从而分析其经济效益。模型以共享储能电站在典型日内收益最大为目标，通过协调共享储能电站以及其连接用户之间的充放电功率，考虑共享储能电站对新能源功率消纳，进而对共享储能经济效益进行分析。在模型求解方面，应用了一种改进黏菌优化算法，在算法的早期阶段，重点是探索共享储能系统容量的初次分配结果的解空间，在后期通过非线性自适应加权系数加速收敛，以确保效率和准确性。最后通过算例分析验证所提基于全寿命周期的共享储能电站日前调度及经济效益模型的合理性，并证明所提方法相较于传统分散式储能更加经济，能够实现储能资源的合理分配，实现共享储能电站与用户之间的互利共赢。

1 含共享储能的微电网系统架构

如图1所示，第三方投资者依靠自身的资金优势，在用户之间构建共享储能电站，形成用户安装光伏或小型风机的微电网。每个用户都配备了负荷管理，收集用户的电力负荷信息。储能电站配备了共享储能运营商，根据政策向微电网调度能源。运营商维护与用户、电网和负荷管理的数据通信。当新能源发电出力小于电力负荷或储能电站无电、储能电站不供电时，为保证工业用户用电安全，将工业用户接入电网。储能电站连接到公用电网，以确保在新能源发电输出低的季节，即用户与储能电站共享较少的能源时，储能得到充分利用。

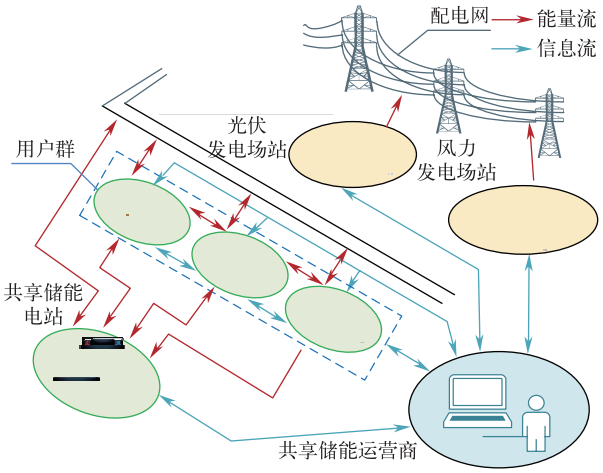

图 1　含共享储能的微电网系统架构

Fig. 1 Microgrid system architecture with shared energy storage

在共享储能电站系统中，将用户新能源发电出力大于负荷的电量定义为用户的剩余电量，用户用电负荷大于光伏发电出力的电量定义为用户缺电。当用户有剩余电量时，用户是共享储能电站的电量供应商。当用户缺电时，电量从储能电站中消耗。储能电站以高于上网电价的价格从用户手中购买共享电量，并以低于电网价格的价格向用户出售电量。与没有共享储能电站的用户相比，用户节省了单独安装存储设备的投资和能源成本。

共享储能运营商根据收集到的信息和策略来决定储能电站的充放电行为。当部分用户用电过剩，而部分用户同时缺电时，运营商将储能电站获得的电量直接出售给缺电用户，从而减少储能的占用。当用户总剩余电量大于总缺电量时，运营商呼叫储能设备充电；当用户总剩余电量小于总缺电量时，运营商呼叫储能设备放电。共享储能电站利用同一用户在不同时间和不同用户在同一时间的用电行为差异，满足不同用户对储能的需求。

2　基于全寿命周期的共享式储能电站经济效益评估模型

2.1　收益模型

共享储能电站（Shared Energy Storage Station，SESS）建立在用户群之间，共享储能服务运营商需建立合理的用户收费机制，以提供优质、高效和专业的服务。通过储能装置充电和放电特性，使得各用户的用电需求不受到时间和容量的限制，并提升储能资源的利用率。SESS的收益主要包括共享储能电站向用户售电的收益以及共享储能电站向用户收取的服务费。

（1）SESS售电收益

$$F_{\mathrm{ess,s}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{N=1}^{n}\delta_{\mathrm{s}}(t)P_{\mathrm{ess,s}}^{N}(t) \tag{1}$$

式中，T为调度时段数；N为用户个数；t为任意时段；$F_{\mathrm{ess,s}}$为SESS售电收益；δ_{s}为其售电电价；$P_{\mathrm{ess,s}}^{N}$为SESS向用户售电功率。

（2）服务费用收益

$$F_{\mathrm{serve}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{N=1}^{n}\delta_{\mathrm{se}}(t)\left(P_{\mathrm{ess,s}}^{N}(t)+P_{\mathrm{ess,b}}^{N}(t)\right) \tag{2}$$

式中，F_{serve}为SESS针对微电网提供服务而收取的费用；δ_{se}为单位功率的服务费用；$P_{\mathrm{ess,s}}^{N}$为SESS向用户购电功率。

2.2　全寿命周期成本模型

本文所建立的SESS全寿命周期成本模型主要由电站初期投资成本、向电网购电的成本以及共享储能电站向用户购电的成本组成。

（1）初期投资成本

SESS的初期投资成本主要由储能电站初期投资等年值与每年用于维护的固定投资费用构成，全寿命周期初期投资成本数学模型为

$$C_1=(\delta_{\mathrm{P}}P_{\mathrm{ess}}+\delta_{\mathrm{E}}E_{\mathrm{ess}}) \tag{3}$$

式中，C_1为SESS的初期投资费用；δ_{P}为SESS单位功率电价成本；δ_{E}为SESS单位容量成本；P_{ess}为SESS的额定充放电功率；E_{ess}为SESS的额定容量。

储能系统的年运行维护费用主要与其规模大小有关，数学模型为

$$C_2=\delta_{\mathrm{yw}}P_{\mathrm{ess}} \tag{4}$$

式中，C_2为SESS年运行维护费用；δ_{yw}为SESS单位功率维护费用。

根据SESS的使用寿命和资金年利率，将SESS全寿命周期内成本进行分摊，并与SESS的年运行维护费用叠加，得到考虑全寿命周期的SESS年平均成本表达式为

$$C'_{\text{inv}} = C_1 \frac{(1+r)^{\gamma} r}{(1+r)^{\gamma} - 1} + C_2 \tag{5}$$

式中，C'_{inv}为SESS年均成本；r为资金年利率，本文取8%；γ为储能装置寿命年限。

因为需要分析SESS在一个典型日内的调度情况，所以需要将考虑全寿命周期的SESS年平均成本划分到每一个典型日，得到其典型日平均成本表达式为

$$C_{\text{inv}} = \frac{1}{365} C'_{\text{inv}} \tag{6}$$

式中，C_{inv}为SESS日均成本。

（2）SESS向电网购电的成本

$$C_{\text{grid}} = \sum_{t=1}^{T} \delta_0(t) P_{\text{grid}}(t) \tag{7}$$

式中，C_{grid}为SESS向电网购电的成本；δ_0为电网单位电能电价；P_{grid}为SESS向电网购电的功率。

（3）SESS向用户购电的成本

$$C_{\text{ess,b}} = \sum_{t=1}^{T} \sum_{N=1}^{n} \delta_{\text{b}}(t) P^N_{\text{ess,b}}(t) \tag{8}$$

式中，$C_{\text{ess,b}}$为SESS向用户购电的成本；δ_{b}为SESS向用户购电的电价。

3 基于全寿命周期的SESS优化配置模型

3.1 目标函数

根据全寿命周期SESS经济效益模型，SESS的收益来源主要包括储能电站出售的电费以及向用户收取的服务费；而其成本主要由储能电站初期投资成本、向电网购电的成本以及向用户购电的成本构成。因此，将SESS在一个典型日内的收益最大作为目标函数，即

$$\max F = F_{\text{ess,s}} + F_{\text{serve}} - C_{\text{inv}} - C_{\text{grid}} - C_{\text{ess,b}} \tag{9}$$

式中，F为SESS日运行净收益。

3.2 约束条件

本文假设不考虑功率的传输损耗与设备损耗，对SESS的日运行优化调度模型进行求解。

（1）用户功率平衡约束

$$\begin{aligned} &P^N_{\text{pv}}(t) + P^N_{\text{wind}}(t) + P^N_{\text{grid}}(t) + \\ &P^N_{\text{ess,b}}(t) - P^N_{\text{ess,s}}(t) - P^N_{\text{load}}(t) = 0 \end{aligned} \tag{10}$$

式中，P_{pv}为光伏发电功率；P_{wind}为风电出力功率；P_{load}为电负荷功率。

（2）新能源发电输出优先供电负荷约束

这一约束确保用户的光伏发电优先供应自己的电力负荷，剩余的电量出售给储能电站共享。

$$\begin{aligned} &P^N_{\text{pv}}(t) + P^N_{\text{wind}}(t) - P^N_{\text{load}}(t) \leqslant (1 - x_d(t)) \\ &P_{\text{ess,s}}(t) + P'_{\text{grid}}(t) - (P^N_{\text{pv}}(t) + P^N_{\text{wind}}(t)) + P^{\text{load},i}_d(t) \leqslant x_d(t) \\ &P_{\text{ess,s}}(t) + P'_{\text{grid}}(t) \leqslant (1 - x_d(t)) \\ &x_d(t) \in \{0,1\} \end{aligned} \tag{11}$$

式中，为P'_{grid}用户向电网购电的功率；$x_d(t)$为一个二元变量。若用户新能源发电出力小于负荷，则$x_d(t)$=1；否则，$x_d(t)$=0。

（3）用户和SESS之间的交互功率约束

$$\begin{cases} 0 \leqslant P^N_{\text{ess,b}}(t) \leqslant P^{\max}_{\text{ess,b}} U^N_{\text{ess,b}}(t) \\ 0 \leqslant P^N_{\text{ess,s}}(t) \leqslant P^{\max}_{\text{ess,s}} U^N_{\text{ess,s}}(t) \\ U^N_{\text{ess,s}}(t) + U^N_{\text{ess,b}}(t) \leqslant 1 \\ U^N_{\text{ess,b}}(t) \in \{0,1\}, U^N_{\text{ess,s}}(t) \in \{0,1\} \end{cases} \tag{12}$$

式中，$P^{\max}_{\text{ess,b}}$和$P^{\max}_{\text{ess,s}}$为用户使用SESS充电和放电功率的最大值；$U^N_{\text{ess,s}}$和$U^N_{\text{ess,b}}$为用户N使用SESS的充放电状态变量。

（4）SESS电荷状态约束

$$\begin{aligned} &E(t) = (1-u)E(t-1) + \left[\eta_{\text{abs}} P_{\text{abs}}(t) - \frac{P_{\text{relea}}(t)}{\eta_{\text{relea}}}\right]\Delta t \\ &E_{\min} \leqslant E(t) \leqslant E_{\max} \end{aligned} \tag{13}$$

式中，$E_{\max}$和$E_{\min}$为SESS的最大和最小荷电状态；$E(t)$为SESS的荷电状态；u为SESS的自放电率，一般可以忽略；η_{abs}和η_{relea}为SESS的充电效率；P_{abs}和P_{relea}为SESS的充放电功率。

（5）SESS充放电功率约束

$$\begin{cases} P^N_{\text{ess,s}}(t) - P^N_{\text{ess,b}}(t) = P_{\text{abs}}(t) - P_{\text{relea}}(t) \\ 0 \leqslant P_{\text{abs}}(t) \leqslant P_{\max} U_{\text{abs}}(t) \\ 0 \leqslant P_{\text{relea}}(t) \leqslant P_{\max} U_{\text{relea}}(t) \\ U_{\text{abs}}(t) + U_{\text{relea}}(t) \leqslant 1 \\ U_{\text{abs}} \in \{0,1\}, U_{\text{relea}} \in \{0,1\} \end{cases} \tag{14}$$

式中，P_{abs}、P_{relea}为SESS的充放电功率；U_{abs}和U_{relea}为SESS的充电状态位和放电状态位；$P_{\max}$为SESS的最大充放电功率。

（6）用户使用SESS充放电功率的平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N}\left[P_{\mathrm{ess,b}}^{N}(t)-P_{\mathrm{ess,s}}^{N}(t)\right]=P_{\mathrm{relea}}(t)-P_{\mathrm{abs}}(t) \quad (15)$$

3.3 改进黏菌优化算法

黏菌具有振荡波产生和正反馈的生理特性，使其在觅食时具有振荡行为。生物振荡器的振荡波随食物浓度增加而增强，导致黏菌静脉管道扩张和细胞内流量增加。黏菌采用限定区域搜索方法，重点搜索高质量的食物来源。若初次发现的食物浓度低，则黏菌离开该来源继续寻找更好的。该算法兼具充分利用解空间和快速找到极值的优点，利用这些特性，可以运用黏菌算法（Slime Mould Algorithm，SMA）求解函数的极值。黏菌优化算法的数学建模如下。

（1）接近食物

为了对黏菌在收敛过程中的行为进行数学建模，本研究引入了以下规则来模拟粘菌的收缩。

$$X(t+1)=\begin{cases}X_{\mathrm{b}}(t)+v_{\mathrm{b}}(WX_{\mathrm{A}}(t)-X_{\mathrm{B}}(t)), r<p\\ v_{\mathrm{c}}X(t), r\geqslant p\end{cases} \quad (16)$$

式中，t为当前迭代次数；$X_{\mathrm{b}}(t)$为当前迭代次数下的最优解；$X_{\mathrm{A}}(t)$和$X_{\mathrm{B}}(t)$为当前迭代次数下的两个随机解；$X(t)$为当前解；$r\in[0,1]$；W、v_{b}、v_{c}、p的表达式为

$$p=\tanh\left|S(i)-\mathrm{DF}\right| \quad (17)$$

$$a=\operatorname{arctanh}\left(-\frac{t}{t_{\max}}+1\right), v_{\mathrm{b}}\in[-a,a] \quad (18)$$

$$W(\mathrm{SI}(i))=\begin{cases}1+r\cdot\lg\left(\dfrac{\mathrm{bF}-S(i)}{\mathrm{bF}-\mathrm{wF}}+1\right), i<\dfrac{m}{2}\\ 1-r\cdot\lg\left(\dfrac{\mathrm{bF}-S(i)}{\mathrm{bF}-\mathrm{wF}}+1\right), i\geqslant\dfrac{m}{2}\end{cases} \quad (19)$$

$$\mathrm{SI}(i)=\mathrm{sort}(S) \quad (20)$$

式中，m为黏菌个数；v_{c}为一个函数，随着迭代次数的增加，它在$[-1,1]$之间振荡，最终趋于0；W为静脉管道宽度；$S(i)$为当前单个解的自适应值；$t_{\max}$为最大迭代次数；DF、bF、wF为当前整个迭代过程中的最优自适应值，当前迭代次数下的最优自适应值和当前迭代过程中的最差自适应值；SI(i)为一次迭代后黏菌种群的自适应排序。这部分主要模拟黏菌的脉络，根据食物的浓度而增厚或变薄。然而，黏菌不会迁移到食物浓度高的地方，黏菌群体中的几个个体总是会被分开寻找其他食物来源。

（2）包裹食物

黏菌个体位置更新如下

$$X(t+1)=\begin{cases}X_{\mathrm{b}}(t)+v_{\mathrm{b}}(WX_{A}(t)-X_{\mathrm{B}}(t)), r<p\\ v_{\mathrm{c}}X(t), r\geqslant p\\ \mathrm{rand}(\mathrm{UB}-\mathrm{LB})+\mathrm{LB}, \mathrm{rand}<z\end{cases} \quad (21)$$

式中，UB、LB为搜索区域的上、下界，一旦随机数小于z，个体将在随机位置寻找食物。

（3）获取食物

在$[-a,a]$范围内，控制参量v_{b}发生了随机振动，且随着迭代次数的增多，幅值逐渐减小并趋于0。系统中的参数v_{c}在$[-1,1]$范围内随机波动，且随着迭代次数的增多而逐渐趋近于0。

3.4 非线性自适应加权系数

为有效提高SMA的寻优性能，本文以加权系数这一关键参量为核心，设计了一种自适应加权系数。由于SMA中参数呈线性变化，导致搜索能力较弱且范围受到限制，寻优能力较弱。在此基础上，提出了一种基于非线性的自适应加权系数w，并给出了相应的黏菌位置更新公式为

$$X(t+1)=\begin{cases}wX_{\mathrm{b}}(t)+v_{\mathrm{b}}(WX_{\mathrm{A}}(t)-X_{\mathrm{B}}(t)), r<p\\ v_{\mathrm{c}}X(t), r\geqslant p\end{cases} \quad (22)$$

$$w=w_{\min}+(w_{\max}-w_{\min})\arctan\left(\frac{\pi t}{2T_{\max}}\right) \quad (23)$$

式中，$w_{\max}$和$w_{\min}$分别为惯性加权系数的最大值和最小值。该文通过相关实验取值为：$w_{\max}$=0.82；$w_{\min}$=0.01。

自适应加权系数w系数变化如图2所示。

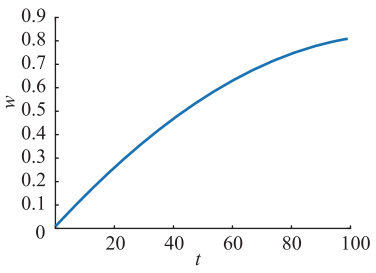

图 2　w 系数变化图

Fig. 2 Variation plot of w coefficient

在迭代初期，加权系数w迅速增加，扩大了搜索区域，而在迭代末期，w的增长速度减缓，这将有助于细菌在搜寻过程中避免陷入局部极值，从而提高算法的准确度，为下一步搜索找到更好定位提供帮助。改变自适应加权系数，即黏菌在觅食时，其位置随黏菌迭代次数不断更新。该算法采用了一种非线性的自适应惯性加权系数，在提高寻优性能的同时，也避免了陷入局部极值。图3给出了改进黏菌优化算法的流程。

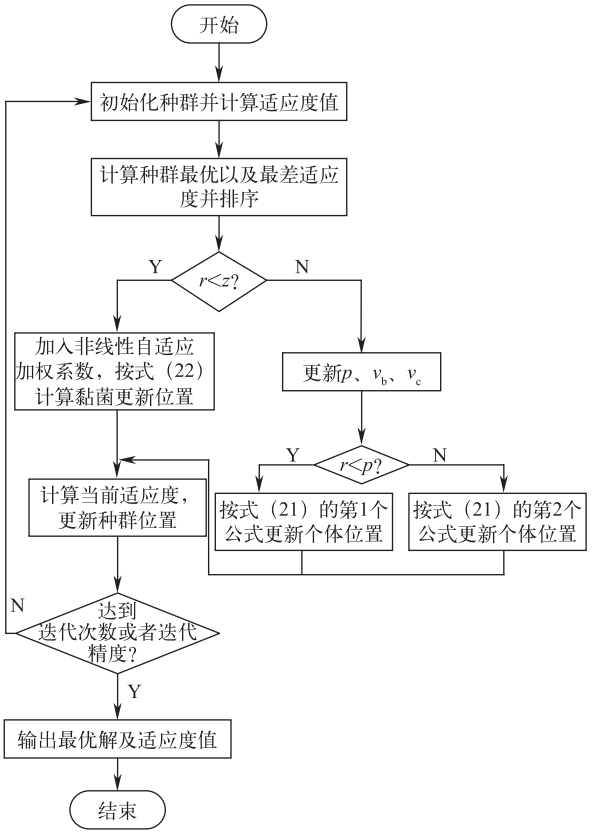

图 3　算法流程图

Fig. 3 Algorithm flowchart

4　算例分析

本文选取新疆地区典型用户作为研究对象，通过设定算例来对共享储能电站在典型日内的用电调度情况以及收益情况进行分析。具体而言，本文设置了3个典型用户，其中：A为新疆某医疗仪器制造厂；B为新疆某器械制造厂；C为新疆某纺织服装制造厂。通过考察用户的用电情况，可以更加全面地了解共享储能电站在实际运行中的应用效果，并为进一步优化储能电站的用电调度提供重要参考。由于用户负荷存在季节性差异，因此按季节划分一年为4个典型日，将4个典型日的平均负荷以及平均新能源出力作为年典型日负荷以及新能源出力，将所得到的年典型日分为24个调度时段，设置年典型日的每个调度时段为1 h。如图4～图6所示，分别表示A、B、C三个用户在年典型日的平均电负荷曲线和平均新能源出力情况。

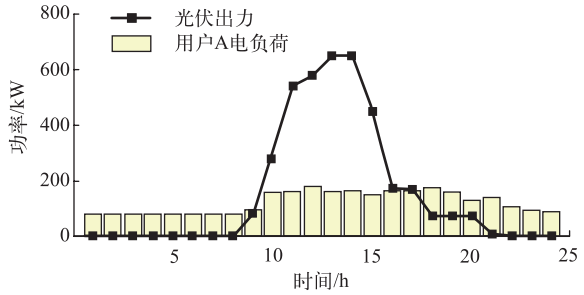

图 4　用户 A 电负荷与光伏出力

Fig. 4 User A electric load and PV output

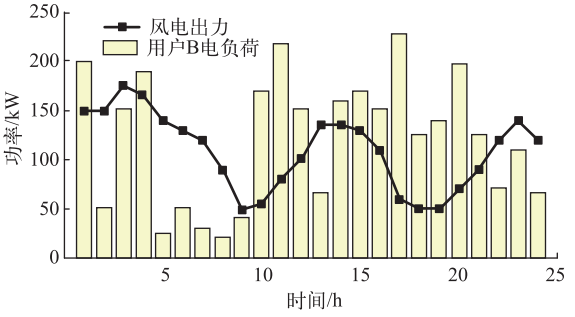

图 5　用户 B 电负荷与风电出力

Fig. 5 User B electric load and wind power output output

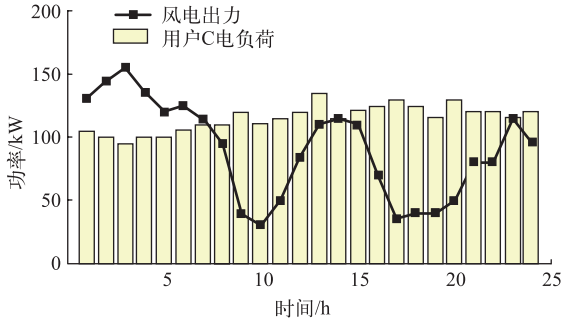

图 6　用户 C 电负荷与风电出力

Fig. 6 User C electric load and wind power output output

电价参数见表1，共享储能参数见表2。

表 1　电价参数

Tab. 1 Electricity price parameters

[单位：元 /(kW·h)]

时段		电价		
		从电网购电电价	从储能电站购电电价	向储能电站售电电价
峰	08:00—12:00 17:00—21:00	1.36	1.15	0.95
平	12:00—17:00 21:00—24:00	0.82	0.75	0.55
谷	0:00—8:00	0.37	0.40	0.20

表 2　共享储能参数设置

Tab. 2 Shared energy storage parameters setting

变量	数值
最大荷电状态	0.9
最小荷电状态	0.1
最大交互功率 /kW	1 000
储能电站容量成本 /[元 /(kW·h)]	1 100
储能电站功率成本 /(元 /kW)	1 000
储能电站年运维成本 /(元 /kW)	72
储能电站寿命周期 / 年	8

在上述算例参数设置下，应用改进黏菌算法对3个用户典型日运行优化调度的结果和共享储能电站的日运行优化调度的结果如图7～图9所示。

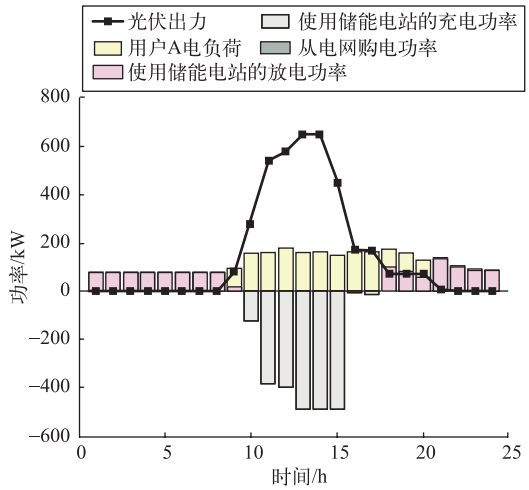

图 7　用户 A 运行控制结果

Fig. 7 User A runs the control results

图7中，由于用户A地处新疆地区，其光伏开始出力从时段8:30开始，在00:00—08:30时段，用户A光伏没有出力，在这段时间内共享储能电站中电量充足，此时段属于电网电价的平时段，但是电网购电成本相较于向共享储能电站购电成本要高，并且为了使共享储能电站收益最高，用户的电负荷需求全部依赖于共享储能电站；在时刻8:30之后，光照逐渐充足，光伏出力逐渐提高，直至出力平衡后，用户可将光伏多余出力电能向共享储能电站交易，共享储能电站将其进行储存，进而实现了对于新能源的消纳，避免了弃电现象的发生。由于新疆受气候以及光照因素的影响，光伏出力在13:00—14:00时段出力达到最大值，为652.8 kW。在此时段，用户A与共享储能电站之间的功率交互达到最大值，为494.5 kW。在时刻15:00后的两个调度时段中，用户A自身的光伏出力基本能够承担其电负荷需求。用户A在15:00后的两个调度时段内，其光伏发电基本能够满足其电负荷需求。但是在17:00—24:00的时段，用户A为了降低运行成本，选择向电价较低的共享储能电站购电，而不是依赖于电网，光伏发电在此时段基本不参与电力供应。在16:30—16:45的短期时间内，用户A利用储能电站放电，使最大功率达到168.3 kW。

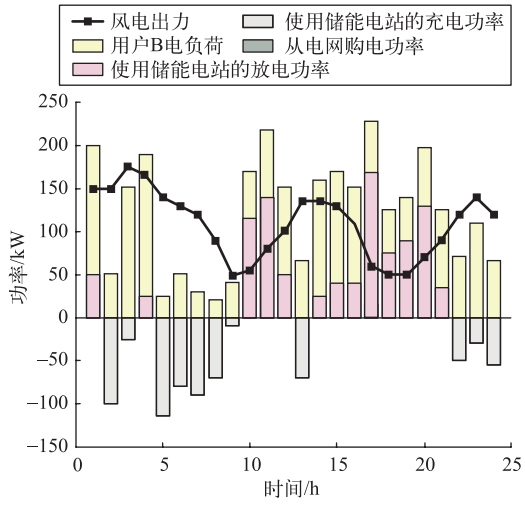

图 8　用户 B 运行控制结果

Fig. 8 User B runs the control results

由图8可以看出，在整个24 h调度时段，用户B的电负荷需求以及风电出力波动性非常大，所以用户B在整个调度时段内会频繁与共享储能电站进行购电售电交易。一方面保证用户总体的运行成本相较于向电网购电有所下降；另一方面

使用共享储能电站能保证其盈利以及对新能源的消纳。在时刻17:00后的一个调度时段，为了共享储能效益最高，并且同时保证用户的运行成本最低，用户从电网少量购买电能，在此时段，其向共享储能电站购电功率最高，为172.3 kW；在04:00—05:00时段，用户向共享储能电站售电功率达到最大值115.6 kW。

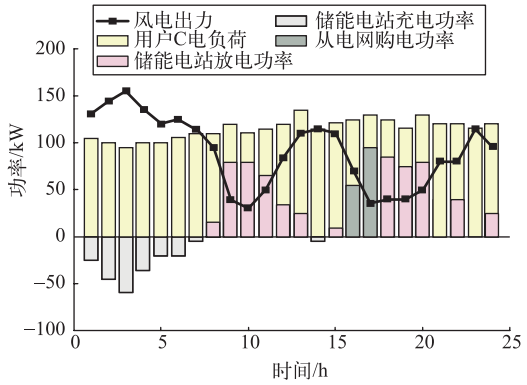

图 9　用户 C 运行控制结果

Fig. 9 User C runs the control results

由图9可以看出，用户C的风电出力波动较大，但其电负荷需求相对来说较为平稳，所以为了降低新能源的消纳率，并提高共享储能电站的收益，当用户风电出力足以承担且超出其负荷需求时，用户向共享储能电站售电；当风电出力不足以承担用户负荷需求时，用户选择向共享储能电站或电网侧购电。在时刻16:00后的一个调度时段，用户向电网侧进行购电，其购电功率达到最大值97.5 kW。在时刻18:00后的一个调度时段，用户与共享储能电站交互功率达到最大值85.3 kW。

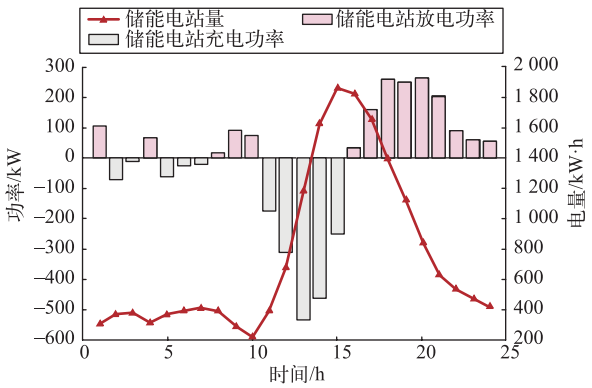

图 10　共享储能电站运行控制结果

Fig. 10 SESS runs the control results

图10为共享储能电站24个时段的调度情况。由图10可以看出，在00:00—10:00时段，由于新疆气候原因，用户光伏、风电出力与用户的电负荷需求不确定性较强，共享储能电站处于充放电交替状态；在10:00之后的五个调度时段内，由于微电网用户的新能源发电总量超过了其自身的电量负荷需求，因此微电网选择将多余的电量出售给共享储能电站，这一举措使得共享储能电站的电量从$0.100E_{max}$逐渐累积至$0.900E_{max}$。然而，在15:00—24:00的时段中，情况发生了逆转。由于光伏和风电的发电量无法满足用户的电力需求，用户转而向共享储能电站购买电量。储能电站开始释放储存的电量，其电量因此从$0.900E_{max}$逐渐下降，最终降至其最大容量的$0.197E_{max}$。在一个年典型日内，储能电站最大充电功率为535 kW，最大放电功率为273 kW。

为分析共享储能配置与分散式储能配置及成本的区别，设置以下两种场景进行对比分析。

1）场景1：3个用户分别配置独立储能装置。

2）场景2：3个用户配置共享储能电站。

场景1和场景2储能电站容量与最大充放电功率对比见表3。由本文对共享储能电站成本模型分析可知，储能电站容量与最大充放电功率在储能电站成本模型计算当中所占比重很大，故对二者进行对比能直观分析出场景1与场景2储能电站成本差别。3个用户分别配置储能装置的容量总和为2 938.48 kW·h，最大充放电功率总和为668.54 kW，则其容量总成本为323.23万元，最大充放电功率总成本为66.85万元。由此可以看出，以上3个用户配置共享储能装置的容量成本可以节省29.50%，最大充放电功率总成本节省19.97%。这说明了用户-储能电站这种共享模式可以高效利用储能资源，降低了储能电站的总成本，为共享储能运用模式提供了盈利空间。

通过使共享储能电站在一个典型日内的经济效益最高，求得共享储能电站的最优容量规划值为2 071.8 kW·h，最大充放电功率为535 kW。故得到共享储能电站初期投资成本为281.39万元，

年运行维护成本为3.85万元，共享储能年售电收益为6.52万元。

表 3　场景 1 与场景 2 储能电站容量与最大充放电功率

Tab. 3 Scenario 1 and scenario 2 SESS capacity and maximum charging and discharging power

场景编号	储能电站容量 /kW·h	最大充放电功率 /kW
场景 1	2 938.48	668.54
场景 2	2 071.8	535

为研究共享储能电站的效益问题，进行如下分析：当储能电站服务费设定为0.25元/（kW·h）时，其年储能服务费收益为40.56万元，共享储能电站投资的回收年限为7.67年，储能电站服务费在一定程度上与储能电站收益呈正相关；当储能电站服务费设定为0.34元/（kW·h）时，其年储能服务费收益为52.81万元，储能电站投资的回收年限为5.74年。共享储能电站服务费定价与回收年限关系如图11所示，可以看出服务费与回收年限呈正相关。图11中，*A*点表示共享储能电站服务费设定为0.238元/（kW·h）时，储能电站投资回收年限恰好为8年；若服务费设置高于该值，则共享储能电站为盈利状态。

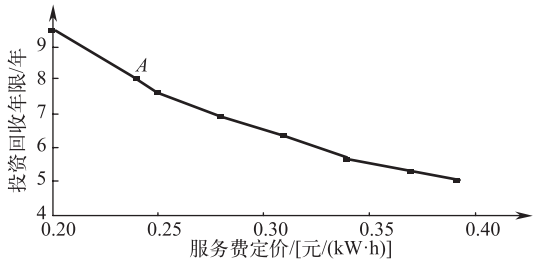

图 11　共享储能电站服务费定价与回收年限关系

Fig. 11 SESS service charge pricing in relation to payback years

（1）算法对比

算法对比如图12所示。从图12中可以看出，运用本文提出的改进黏菌算法来解决共享储能优化配置模型，仅需50次迭代便满足了预设的终止条件，并找到了全局最优解，相较于对照组算法，迭代次数减少了20次。这表明所设计的方法在收敛速度上具有显著优势。

（2）敏感性分析

如图13a、b所示，由于共享储能功率与容量

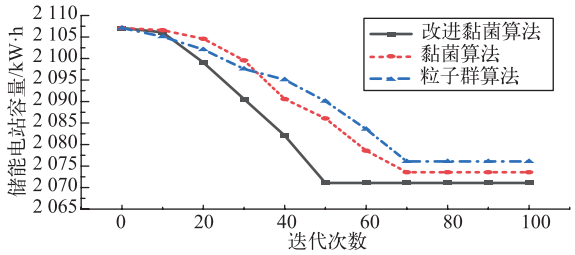

图 12　算法对比

Fig. 12 Algorithm comparison

存在成本约束，计算得到其最优装机容量和最优功率分别为2 071.8 kW·h和535 kW。当储能所配置的容量和功率分别增大或减小时，均会增加系统的投资成本。当储能容量增加时，投资回收期随之上升；当储能功率增加时，投资回收期反而下降，这主要是因为容量成本远高于功率成本，使得共享储能因容量增加所带来的增益远比功率增加所带来的增益小。因此，应该着重关注共享储能的容量大小。

如图13c、d所示，在共享储能的系统维护成本、容量成本、功率成本和残值回收率这4个不确定因素中，容量成本波动对总成本的影响最大。

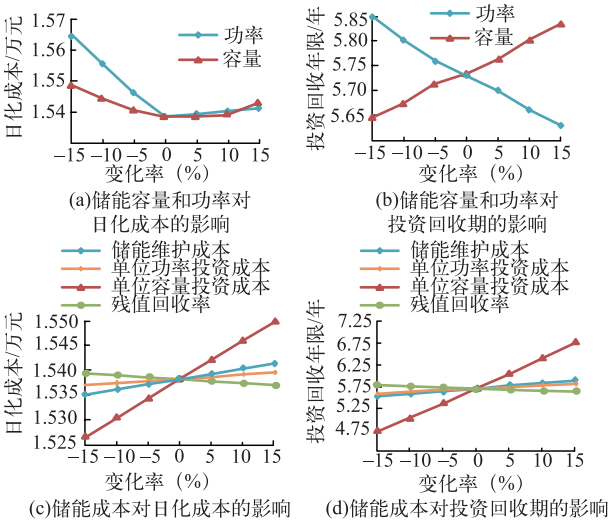

图 13　不确定因素敏感性分析

Fig. 13 Uncertainty sensitivity analysis

5　结束语

本文提出了基于全寿命周期的共享储能电站成本模型，并分析了储能效益来源。用户在用电高峰期向共享储能电站购电，在低谷期向共享储

能电站售电；储能电站通过收取用户购电费和服务费来获利，最大程度地降低共享储能电站的投资回收年限。以共享储能电站典型日收益最大为目标函数，计及用户侧电功率平衡约束、新能源发电输出优先供电负荷约束等，通过改进黏菌优化算法对该问题进行求解，结论如下：

1）引入共享式的储能服务模式后，用户从电网购电的需求显著减少，更倾向于选择共享储能电站进行购电，这表明共享储能电站服务的推出对多个用户的用电行为产生了积极影响，减轻了电网向众多用户供电的负担。

2）用户配置共享储能电站与各用户内部配置独立储能电站相比，其容量成本可节省29.49%，最大充放电功率成本节省19.97%。这说明了用户-储能电站这种共享模式相比于独立储能电站，能够高效利用储能资源，降低储能电站总成本。

3）在保证用户经济成本的前提下，共享储能电站与用户之间需要设计合理的收益方案，其结果将直接影响共享储能电站的回本年限。一般情况下，储能电站使用寿命为8年，当共享储能电站服务费设置为0.238元/（kW·h）时，恰好保证其在8年回收投资成本。为保证SESS盈利，可设定该电站服务费高于0.238元/（kW·h）。

参考文献

[1] XIA Changliang, SONG Zhanfeng. Wind energy in China：current scenario and future perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(8)：1966-1974.

[2] 刘畅，卓建坤，赵东明，等．利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]．中国电机工程学报，2020，40(1)：1-18,369．

[3] 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．

[4] 张亮，李章溢，裴玮，等．基于综合需求响应的工业园区联络线功率控制[J]．电力工程技术，2021，40(3)：106-113．

[5] 张军，钟康骅，张勇军，等．基于混合博弈的多区域电-储共享运营模式与经济效益分析[J]．电力系统自动化，2024，48(3)：31-41．

[6] 王慧敏．基于区块链技术的共享储能交易模型分析[J]．储能科学与技术，2023，12(3)：1004-1005．

[7] 冀瑞强，胡健，张晓杰．基于合作博弈的城市楼宇集群分布式储能容量共享[J]．电力建设，2024，45(2)：115-126．

[8] 帅轩越，马志程，王秀丽，等．基于主从博弈理论的共享储能与综合能源微网优化运行研究[J]．电网技术，2023，47(2)：679-690．

[9] 袁浩锋，苗桂喜，王鑫，等．基于纳什谈判的微电网与共享储能协同运行策略[J]．东北电力技术，2023，44(12)：30-36．

[10] 臧云帆，夏晟，李嘉文，等．含共享储能的微电网群分布鲁棒博弈优化调度方法[J]．电力系统保护与控制，2023，51(24)：90-101．

[11] 张富平，李志宏，常好晶，等．计及分布式电源不确定性的微网储能容量博弈优化[J]．可再生能源，2019，37(7)：1042-1048．

[12] 刘舒，李正力，王翼，等．含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]．电力系统保护与控制，2016，44(3)：78-84．

[13] 赵宇轩，宋伟峰，李伟康，等．考虑共享储能容量配置的多虚拟电厂优化运行方法[J]．电网与清洁能源，2024，40(1)：92-101．

[14] 王娟，曾国辉，黄勃，等．考虑退役电池梯次利用的多微网共享储能优化配置[J/OL]．电源学报，1-12 [2024-07-02]．

[15] 田欣，陈来军，李笑竹，等．基于主从博弈和改进Shapley值的分布式光伏社区共享储能优化运行策略[J]．电网技术，2023，47(6)：2252-2261．

作者简介

段双明（1984—），男，博士，高级实验师，研究方向新能源发电运行控制。

（收稿日期：2024-09-23）