DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.5.262 **中图分类号**：TM734 **文献标志码**：A

考虑退役电池梯次利用的多微网共享储能优化配置

王 娟，曾国辉，黄 勃，刘 瑾
(上海工程技术大学电子电气工程学院，上海 201620)

摘要：在“双碳”目标下，针对投入微网储能系统资金过高、新能源汽车退役电池的去向问题，提出考虑退役电池梯次利用的多微网共享储能系统双层优化配置模型。首先，分别对基于退役电池的共享储能多微网系统进行建模。其次，采用双层的容量配置模型，分别以微网的投资运维成本为上层目标函数，以储能日运行成本为下层目标函数，采用粒子群优化算法和 Cplex 线性求解器相结合对共享储能的容量配置和设备运行状态进行求解。最后，通过算例分析验证模型能够有效减少各项成本，提高资源利用率，且效果显著。

关键词：多微网；共享储能；退役电池；容量配置

Optimal Configuration of Multi-microgrid Shared Energy Storage Considering Stepwise Utilization of Retired Batteries

WANG Juan, ZENG Guohui, HUANG Bo, LIU Jin
(School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Under the “Dual-carbon” target, aimed at the problems of excessive investment in microgrid energy storage systems and the arrangement of retired batteries of new energy vehicles, a dual-layer optimal configuration model of a multi-microgrid shared energy storage system considering the stepwise utilization of retired batteries was proposed. First, the multi-microgrid shared energy storage system based on retired batteries was modeled. Second, a dual-layer capacity configuration model was adopted with the investment and operation and maintenance cost of microgrids as its upper-layer objective function and the daily operation cost of energy storage as its lower-layer objective function. The particle swarm optimization algorithm and Cplex linear solver were combined to solve the capacity configuration and equipment running state of shared energy storage. Finally, the result of an example indicates that the proposed model can effectively reduce costs and improve the utilization rate of resources, and the corresponding effect is remarkable.

Keywords: Multi-microgrid; shared energy storage; retired battery; capacity configuration

自“双碳”目标明确提出以来，建设以新能源为主导的现代电力系统已成为中国电力行业发展改革的新导向。近年来，我国清洁能源发电在电力系统中的比重迅速增加。以光伏、风能为主的微网由于其间歇性和波动性，接入电力系统会损坏系统的稳定性。接入储能系统可以根据网需求快速生产或吸收能量，然而当前的微网以分布式单独储能应用为主，但单次投入储能系统资金过高，成本回收周期较长，不利于储能在用户侧的发展，从而限制了微网侧储能系统的大规模应用。

针对此现状，国内外学者提出了共享储能模式，共享储能模式将储能的拥有权和使用权进行解耦，通过规模经济有效解决分布式储能的资金问题和空间问题。共享经济在电力系统各领域广泛兴起

收稿日期：2023-02-06；**修回日期**：2023-05-25；**录用日期**：2023-07-04；**网络首发日期**：2023-07-21
基金项目：上海市科委科技创新行动计划项目(22S31903700，21S31904200)
This work is supported by Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan under the grants 22S31903700 and 21S31904200

与应用，共享储能成为降低储能投资规模并提高资源利用率的研究热点[1]。目前，针对共享储能的研究主要集中在运营机制、交易模式、优化调度等。例如：文献[2]基于共享储能理念，提出基于区块链技术的非合作博弈交易模型，提高储能的利用效率，实现利益最大化；文献[3]提出基于合作博弈模式的共享储能模型，并验证其经济性；文献[4]对多风电场联合共享储能合作并网的互动机制和成本分摊机制进行展开分析，有效提升了运营收益；文献[5]考虑需求响应和共享储能对多微网进行优化调度，采用双层优化模型，验证所提策略的经济性。综上，现有对共享储能研究主要集中在共享储能的运行方式及其经济性，但相关研究对共享储能的配置与其经济性组成探讨较少。

针对上述问题，本文聚焦于储能系统配置与组成的经济性。为进一步降低成本，考虑到电池储能成本较高，相较于新电池，电池的二次回收利用可有效降低成本。目前，我国大批量动力电池逐渐进入退役期，将梯次利用的储能应用于现代电力系统中，可提高退役动力电池的利用率，促进资源循环利用。文献[6]通过对退役电池采用恢复容量技术并进行梯次利用，表明对车载退役电池进行研究具有现实意义；文献[7]设计了一套标准集装箱式梯次利用电池储能系统集成，为退役电池规模化应用于储能系统提供参考；文献[8]考虑退役电池的时间尺度对风电场进行混合储能的容量配置；文献[9]将退役电池模块进行快速分类并将其应用于光伏电站的储能系统；文献[10]从电池健康度角度出发，将梯次储能系统引入微网群进行容量配置，降低配置成本。但文献[8-10]未对退役电池应用于大规模微网群共享储能系统进行考虑研究，且对退役电池进行二次回收梯次利用[11]，是未来的发展趋势之一。

本文以微网群为载体，提出基于退役电池梯次利用的多微网共享储能系统优化配置方法。首先，针对退役电池的容量和寿命进行分析，对系统模型进行分析，建立微网群共享储能模型；其次，考虑梯次储能的投资成本，以配置成本和调度成本最小为目标函数，以微网和共享储能的运行条件为约束条件，构建容量配置模型；然后，提出双层优化模型，采用粒子群优化算法与 Cplex 求解器相结合对模型进行优化求解；最后，结合算例对所提模型的有效性进行分析验证。

1　基于退役电池的共享储能模型

1.1　多微网共享储能系统框架

共享储能服务于多微网系统运行时，需要对其容量及功率进行合理配置，同时多个微网根据共享储能所给的额定容量划分各个微网所需容量和充放电功率，调整微网各部分的设备出力。共享储能与微网连接情况如图 1 所示，图中，MG1、MG2、…、MG*n* 为配电网分别在不同地点接入的 *n* 个微网，多微网系统供耗电信息互相分享组成微网群。共享储能系统由储能电池、调度中心及支撑平台系统组成，调度中心可对微网系统电力负荷需求及时进行响应，对储能模块进行充放电模式管理。

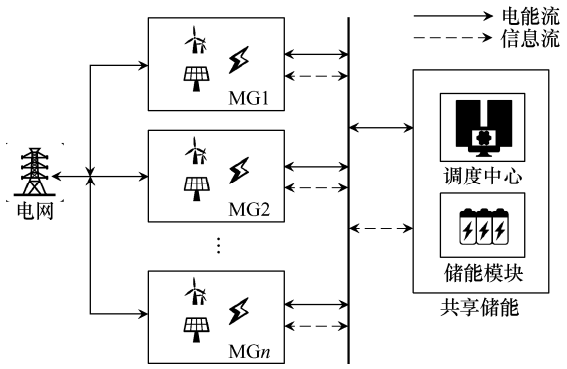


图 1　共享储能与微网连接示意

Fig. 1 Schematic of connections between shared energy storage and microgrids

相较于常规储能模式，通过共享储能母线与各微网单独相连，微网系统可以通过母线实现能量互换，实现多微网系统电能的空间转换。共享储能根据储能充放电量以及各微网购售电费用进行计算，调度中心根据电网电价、微网用电状态以及储能荷电状态等参数确定充放电功率，进行成本计算。

1.2　退役电池储能寿命分析

将从电动汽车上退役下的电池进行处理和二次循环利用测试，结果表明，与新电池相比，退役

磷酸铁锂电池未出现加速衰减现象，据此可近似预测其二次利用的寿命，容量保持率与电池的循环次数基本符合线性关系[12]，即

$$y = -2.604\ 3\times10^{-5}x + 0.834\ 7 \tag{1}$$

式中：y 为容量保持率；x 为充放电循环次数。则梯次电池的共享储能系统使用年限 T 为

$$T = \frac{L_2 - L_1}{365m} \tag{2}$$

式中：L_1 为购买退役电池的容量保持率所对应的循环次数；L_2 为终止梯次利用时退役电池的容量保持率所对应的循环次数；m 为每日的等效循环次数。

2 共享储能容量优化配置模型

当多个微网参与时，先提出优化目标，再对各分量进行描述加上约束条件，以日配置成本和调度成本最小化为目标。上层目标函数为投资和运维成本最小，下层目标函数为日运行费用最低。双层规划可兼顾上下层双方的利益，上层模型将各设备容量传递给下层模型，下层模型基于设备容量，在各种约束下模拟系统优化运行，将系统运行成本传递给上层模型，上层模型再基于运行结果修正容量规划后传递给下层模型，如此反复迭代，得到最优配置结果。双层配置模型如图 2 所示。

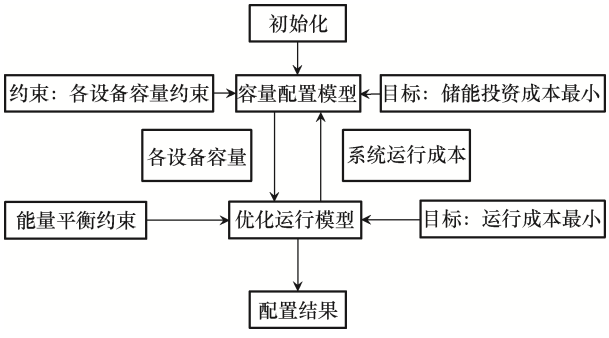


图 2 双层配置模型

Fig. 2 Dual-layer configuration model

2.1 上层共享储能配置模型

在上层优化配置模型中，根据微网的运行情况和相关参数对共享储能进行配置，决策变量为共享储能的容量和最大充放电功率，优化目标为共享储能日运行和维护成本最低。

2.1.1 目标函数

上层模型目标函数为

$$\min C = C_{\mathrm{I}} + C_{\mathrm{O}} \tag{3}$$

式中：C_{I} 为共享储能的日平均投资；C_{O} 为维护成本。

(1)共享储能投资费用，表示为

$$C_{\mathrm{I}} = \frac{\gamma(1+\gamma)^T}{365[(1+\gamma)^T - 1]}(\alpha_P P_{\mathrm{B}} + \alpha_E E_{\mathrm{B}}) \tag{4}$$

式中：γ 为成品率；α_P 为梯次利用储能系统的单位功率成本；α_E 为单位容量成本；P_{B} 为梯次利用储能系统的额定功率；E_{B} 为额定容量。

估算退役电池储能系统的容量单价 β 为

$$\beta = \beta' \frac{T}{T'} \tag{5}$$

式中：β' 为健康电池储能系统的容量单价；T' 为健康电池储能的使用年限。

(2)维护费用，表示为

$$C_{\mathrm{O}} = \delta P_{\mathrm{B}} \tag{6}$$

式中，δ 为单位功率维护成本。

2.1.2 约束条件

(1)共享储能充放电约束，表示为

$$E_{\mathrm{B}}(t) = E_{\mathrm{B}}(t-1) + \left[\eta_{\mathrm{abs}} P_{\mathrm{abs}}(t) - \frac{1}{\eta_{\mathrm{relea}}} P_{\mathrm{relea}}(t)\right]\Delta t \tag{7}$$

$$0.1E_{\mathrm{B}}^{\max} \leqslant E_{\mathrm{B}}(t) \leqslant 0.9E_{\mathrm{B}}^{\max} \tag{8}$$

式中：η_{abs}、η_{relea} 分别为充、放电效率；$P_{\mathrm{abs}}(t)$、$P_{\mathrm{relea}}(t)$ 分别为 t 时段的充、放电功率；$E_{\mathrm{B}}^{\max}$ 为储能的最大容量。

(2)荷电状态约束，表示为

$$\begin{cases} U_{\mathrm{abs}}(t) + U_{\mathrm{relea}}(t) \leqslant 1 \\ 0 \leqslant P_{\mathrm{abs}}(t) \leqslant U_{\mathrm{abs}}(t) P_{\mathrm{B}} \\ 0 \leqslant P_{\mathrm{relea}}(t) \leqslant U_{\mathrm{relea}}(t) P_{\mathrm{B}} \end{cases} \tag{9}$$

式中，$U_{\mathrm{abs}}(t)$、$U_{\mathrm{relea}}(t)$ 为储能充电位和放电位，为 0-1 变量。

(3)储能一天始末状态相等约束，表示为

$$E_{\mathrm{B}}^0 = E_{\mathrm{B}}^T \tag{10}$$

式中：E_{B}^0 为调度周期中储能初始电量；E_{B}^T 为调度

周期末储能最终电量。

2.2 下层优化运行模型

下层模型用于求解多微网系统的运行问题，结果受外层模型决策变量影响，其目标函数为调度成本最低。

2.2.1 下层目标函数

下层目标函数为

$$C_{\mathrm{G}}=\sum_{t=1}^{N_{\mathrm{T}}}\sigma(t)P_{\mathrm{G},i}(t)\Delta t \tag{11}$$

式中：C_{G} 为系统与电网之间进行购售电的交互成本；$\sigma(t)$ 为 t 时段的电价；$P_{\mathrm{G},i}(t)$ 为第 i 个微网在 t 时段与电网交互的功率；N_{T} 为调度周期时段数。

2.2.2 约束条件

(1)电功率平衡约束，表示为

$$P_{\mathrm{WT},i}(t)+P_{\mathrm{PV},i}(t)+P_{\mathrm{grid},i}(t)+P_{\mathrm{B,abs},i}(t)-P_{\mathrm{B,relea},i}(t)-P_{\mathrm{load},i}(t)=0 \tag{12}$$

式中：$P_{\mathrm{WT},i}(t)$ 为第 i 个微网在 t 时段的风力发电功率；$P_{\mathrm{PV},i}(t)$ 为第 i 个微网在 t 时段的光伏发电功率；$P_{\mathrm{grid},i}(t)$ 为第 i 个微网在 t 时段与电网的交互功率；$P_{\mathrm{B,abs},i}(t)$、$P_{\mathrm{B,relea},i}(t)$ 分别为共享储能 t 时段的充、放电功率；$P_{\mathrm{load},i}(t)$ 为第 i 个微网在 t 时段的电负荷功率。

(2)与电网交互功率约束，表示为

$$P_{\mathrm{grid,mg}}^{\min}(t)\leqslant P_{\mathrm{grid}}(t)\leqslant P_{\mathrm{grid,mg}}^{\max}(t) \tag{13}$$

式中：$P_{\mathrm{grid}}(t)$ 为系统典型日在 t 时段从电网的购电功率；$P_{\mathrm{grid,mg}}^{\min}(t)$、$P_{\mathrm{grid,mg}}^{\max}(t)$ 分别为微网售电的最小功率和购电的最大功率。

3 模型求解方法

本文将模型转化为双层规划问题求解，上层采用粒子群优化算法，将投资成本和运行成本均摊到每日，以 1 h 为周期进行寻优，通过粒子的形式将各设备容量传递至下层。下层采用 Cplex 求解器，以每日的运行费用最低为目标，求解在上层相应容量配置下的最优运行方案，并将结果反馈到上层。上层根据返回值计算目标函数，得到最优配置方案。

步骤 1　采集微网典型日的负荷数据及其能源数据。

步骤 2　采用粒子群优化算法对上层模型进行求解，随机初始化种群粒子，根据上层模型各决策变量的取值范围，初始化粒子群位置、速度，当前迭代次数 k_{iter}=0。

步骤 3　针对调度日 t 时段的负荷数据，以上层模型求得的储能配置容量为约束条件，推进下层规划模型运算，调用 Cplex 求解器得到每个粒子在各调度时刻所对应共享储能的充放电功率以及购电功率，确定优化过程中储能最大充放电功率及所需最大容量作为额定功率及容量。

步骤 4　将下层模型求解结果返回至上层模型，并求解适应度得出当前个体最优和群体最优。

步骤 5　上层模型粒子群更新，更新粒子群速度和位置，k_{iter}=k_{iter}+1。

步骤 6　执行步骤 3。若达到最大迭代次数即 k_{iter}=100，则结束算法，获得各时刻运行的共享储能功率，输出当前的运行策略。

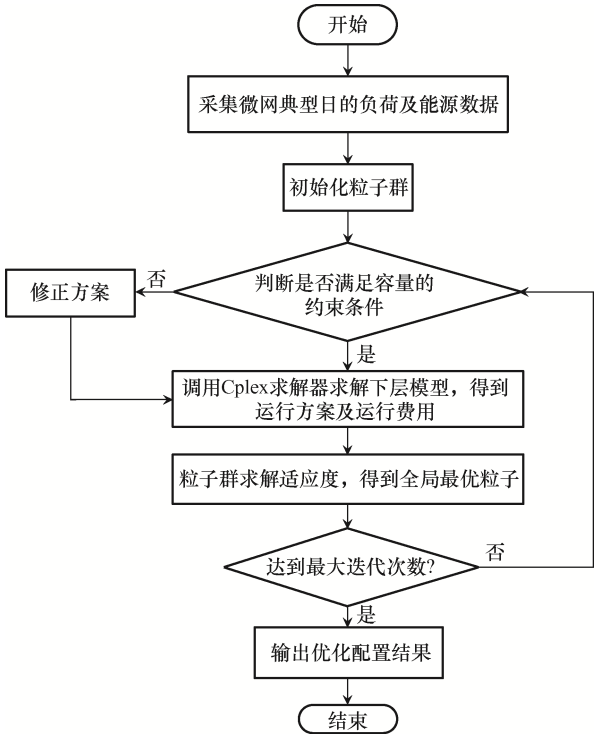


图 3　求解模型流程

Fig. 3 Flow chart for solving the model

4 算例分析

算例采用的多微网系统包括 3 个微网(MG1、MG2、MG3)，算例以文献[12]的数据为参考，各微网与共享储能母线直接相连，微网之间不能直接交换能量，取某个典型日的 24 个调度时段，每个调度时段为 1 h。微网的共享储能参数[13]及储能参数[14]见表 1，购电分时电价如图 4 所示，售电价格为购电价格的 80%。

表 1 微网储能配置参数

Tab. 1 Configuration parameters of microgrid energy storage

参数	数值
成品率/%	80
梯次储能使用时间/a	5
梯次储能容量成本/(元/kW)	1 250
梯次储能功率成本/[元/(kW·h)]	400
单位容量梯次储能重组费用/[元/(kW·h)]	50
健康储能容量成本/(元/kW)	1 000
健康储能功率成本/[元/(kW·h)]	3 500
健康储能使用时间/a	10
调度间隔/h	1

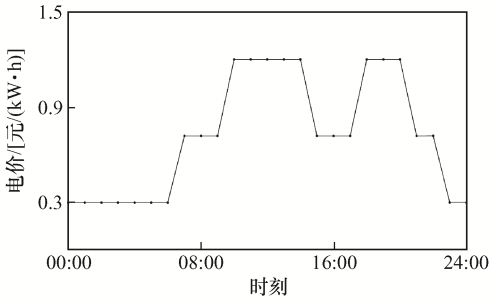


图 4 电网分时电价

Fig. 4 Time-of-use electricity price for power grid

为分析退役电池梯次利用的共享储能的作用成效，设置以下 3 种场景进行对比分析：

场景 1：采用健康电池对 3 个微网分别配置储能系统；

场景 2：采用健康电池配置共享储能系统；

场景 3：采用退役动力电池配置共享储能系统。

各场景下多微网的储能配置容量和功率以及配置成本和调度成本见表 2。

场景 1 采用健康电池对 3 个微网分别配置储能运行，总配置成本为 6 669.82 元，场景 2 采用健康电池配置共享储能运行，比场景 1 降低 2.22%。场景 1 最优容量之和为 7 307.80 kW·h，场景 2 配置容量比场景 1 降低 5.34%。场景 1 多微网系统总配置功率为 2 206.37 kW，场景 2 共享储能的配置功率比场景 1 的总配置功率低 21.09%。场景 1 多微网系统总成本为 11 898.55 元，场景 2 的总成本比场景 1 的低 25.37%。由此可以看出，各微网供电和用电需求存在差异和互补性，使用共享储能可以在满足多微网系统储能使用需求的情况下配置较少的容量和功率，消耗更少的配置成本和调度成本，提高资源的利用率，降低成本。

表 2 各场景储能配置情况对比

Tab. 2 Comparison of energy storage configuration in different scenarios

场景		配置容量/(kW·h)	配置功率/kW	配置成本/元	调度成本/元
1	MG1	349.12	195.87	459.57	2 063.14
	MG2	2 993.77	920.33	2 527.68	892.05
	MG3	3 964.91	1 090.17	3 682.57	2 273.54
2		6 917.83	1 741.03	6 521.67	2 357.81
3		8 000.00	1 987.33	5 200.61	1 578.54

场景 3 下退役电池梯次利用的共享储能配置模型的日配置成本与调度成本分别比场景 1 降低 22.03%以及 69.81%，可见多微网系统通过配备退役电池梯次利用的共享储能系统，将微网在多电时刻的电量储存至共享储能，供其他微网在缺电时使用，可以减少微网从电网购电的成本，降低微网的日运行成本。场景 3 比场景 2 的配置成本和调度成本降低了 20.26%以及 33.05%，配置容量和配置功率分别提高了 15.64%及 14.15%，梯次储能在满足微网需求的情况下虽然配置容量和配置功率有所

提高，但整体降低了多微网系统的运行成本，节省了投资成本。

对比不同场景下系统的配置成本和调度成本，将场景 3 和场景 1、场景 2 分别对比可以得出，常规储能的购买成本及运维成本较高，导致动力电池梯次利用的共享储能比场景 1 节省了 5 119.40 元，比场景 2 日均节省成本 2 100.33 元。

共享储能的充放电功率以及购电功率对比分别如图 5 和图 6 所示。

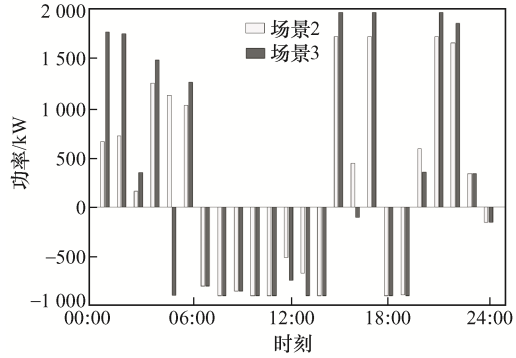


图 5　场景 2 和场景 3 共享储能充放电功率对比

Fig. 5 Comparison of charging and discharging power of shared energy storage in Scenarios 2 and 3

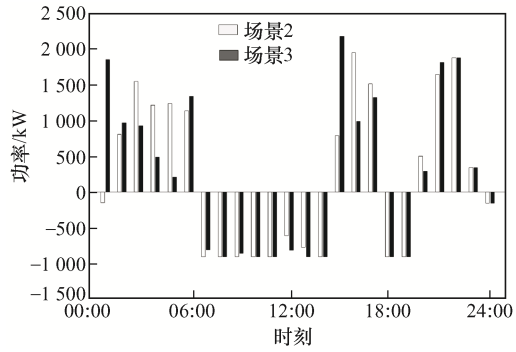


图 6　场景 2 和场景 3 购电功率对比

Fig. 6 Comparison of purchased power in Scenarios 2 and 3

梯次共享储能充放电行为如图 5 所示，其中共享储能放电时充放电功率为正；共享储能充电时充放电功率为负。梯次利用的共享储能配置结果：最大放电功率为 1 987 kW，容量为 8 000 kW·h。共享储能在 15:00—17:00 以及 21:00 时达到最大放电功率 1 987 kW，经历了 3 次满充行为。储能系统的充电时间主要集中在 00:00—07:00 之间，由图 4 和图 5 可知，共享储能充电时段从电网购电价格较低，用户负荷较小，新能源发电充足，在满足负荷需求的情况下，实现新能源发电的最大利用率，几乎不售电。相较于采用健康电池的共享储能系统，场景 3 利用储能充放电功率更大，利用率更高。由以上对比可以看出，使用共享储能模式下进行储能系统的优化配置，能够有效缩减储能系统的配置规模，实现储能资源利用率的提升，减少储能资源的消耗，从而节省投资建设储能的大量费用。

对场景 2 和场景 3 的购售电进行分析，由图 6 可见，在 01:00—06:00 时段，电负荷较少，电量主要用于储能系统充电，此时购电价格较低，可通过购电满足负荷需求的同时实现储能的电量充足；在 07:00—19:00 时段，电量基本满足用电需求，购电较少，且可在电价较高时将多余的电能进行售卖取得盈利，降低系统整体成本，其中 15:00—17:00 时段购电价格较低，可进行部分购电；20:00—23:00 时段内，场景 3 的梯次利用共享储能可以更好地根据用电需求合理调节，降低用电成本。

由以上对比可得，采用梯次利用退役电池的共享储能进行多微网储能系统的优化配置，既能够缩减储能配置规模，提高资源利用率，减少储能资源和场地的浪费，节省大量投资建设独立储能的费用，同时又实现了各微网的能量互补，降低与电网的功率交互费用，降低系统运行成本。退役电池的配备虽降低了使用年限，但同时降低了配置成本和调度成本，且储能的充放电行为得到了进一步优化，既发挥了退役电池的使用价值，又促进了新能源产业发展，实现了能源的高效利用。

5　结论

本文以共享储能为背景，采用退役动力电池，建立了基于退役电池梯次利用的多微网共享储能优化配置模型，以配置成本和调度成本最低为目标，建立双层配置模型并采用粒子群优化算法和 Cplex 求解器相结合进行模型求解。通过分析计算 3 种场景下的配置情况，通过不同类型的储能进行比较，验证了所提模型的经济性和有效性。算例分

析得出结论如下：

(1)通过配备共享储能，可以节省各微网的储能系统建设投资成本，同时显著降低微网储能整体的配置容量和配置功率，降低投资成本和运维成本，提高资源利用率。

(2)对储能系统配置梯次利用的退役电池，在充分考虑储能寿命的情况下，提高了目标函数的计算准确性，令配置方案更加符合实际。

(3)采用共享储能配置微网能够有效改善多微网系统用电行为，实现电能的削峰填谷，减轻电网支撑多微网系统负荷需求的压力，降低系统成本。

参考文献：

[1] 邱伟强, 王茂春, 林振智, 等. “双碳” 目标下面向新能源消纳场景的共享储能综合评价[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 244-255.
Qiu Weiqiang, Wang Maochun, Lin Zhenzhi, et al. Comprehensive evaluation of shared energy storage towards new energy accommodation scenario under targets of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 244-255. (in Chinese)

[2] 王珣, 刘瑾, 沈玮. 基于区块链技术的非合作博弈共享储能交易模型[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2022, 14(5): 595-603.
Wang Xun, Liu Jin, Shen Wei. Non-cooperative game trading model for shared energy storage based on blockchain [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2022, 14(5): 595-603. (in Chinese)

[3] Han Liyang, Morstyn T, McCulloch M. Constructing prosumer coalitions for energy cost savings using cooperative game theory [C]// 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC). Dublin, Ireland, 2018: 1-7.

[4] 江岳文, 郑晨昕. 风电场群联合共享储能两阶段协同并网优化[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3426-3439.
Jiang Yuewen, Zheng Chenxin. Two-stage operation optimization for grid-connected wind farm cluster with shared energy storage [J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3426-3439. (in Chinese)

[5] 徐艳春, 刘海权, 孙思涵, 等. 计及需求响应和共享储能的多微网系统双层优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(6): 18-26.
Xu Yanchun, Liu Haiquan, Sun Sihan, et al. Bi-level optimal scheduling of multi-microgrid system considering demand response and shared energy storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(6): 18-26. (in Chinese)

[6] 梁新成, 张勉. 车载退役锂离子电池回收研究[J]. 电源学报, 2022, 20(4): 86-91.
Liang Xincheng, Zhang Mian. Study on recycling of ex-service lithium-ion batteries used in electric vehicles [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(4): 86-91. (in Chinese)

[7] 朱运征, 李志强, 王浩, 等. 集装箱式储能系统用梯次利用锂电池组的一致性管理研究[J]. 电源学报, 2018, 16(4): 80-86.
Zhu Yunzheng, Li Zhiqiang, Wang Hao, et al. Research on consistency management of echelon use of Li-ion battery pack for container-type energy storage system [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(4): 80-86. (in Chinese)

[8] 李培强, 李雄, 蔡笋, 等. 风电场含退役动力电池的混合储能系统容量优化配置[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 492-498.
Li Peiqiang, Li Xiong, Cai Sun, et al. Capacity optimazation configuration of hybrid energy storage system with retired power batteries in wind farms[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(5): 492-498. (in Chinese)

[9] Li Xinzhou, Zhang Lizhong, Liu Yi, et al. A fast classification method of retired electric vehicle battery modules and their energy storage application in photovoltaic generation [J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(3): 2337-2344.

[10] 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)

[11] 刘征宇, 郭乐凯, 孟辉, 等. 基于改进DBSCAN的退役动力电池分选方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(11):

3073-3083.

Liu Zhengyu, Guo Lekai, Meng Hui, et al. A sorting method of retired power battery based on improved DBS CAN [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(11): 3073-3083. (in Chinese)

[12] 吴鸣, 孙丽敬, 寇凌峰, 等. 考虑需求侧响应的主动配电网电池梯次储能的容量配置方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 71-79.

Wu Ming, Sun Lijing, Kou Lingfeng, et al. Capacity configuration method for second-use electric vehicle batteries of active distribution network based on demand side response [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 71-79. (in Chinese)

[13] 李咸善, 解仕杰, 方子健, 等. 多微电网共享储能的优化配置及其成本分摊[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 44-51.

Li Xianshan, Xie Shijie, Fang Zijian, et al. Optimal configuration of shared energy storage for multi-microgrid and its cost allocation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 44-51. (in Chinese)

[14] 余晓玲, 靳文涛, 韩晓娟, 等. 基于退役动力电池梯次利用的光伏充电站容量配置[J]. 电器与能效管理技术, 2017(13): 39-45, 55.

Yu Xiaoling, Jin Wentao, Han Xiaojuan, et al. Optimized capacity configuration of PV-based electric vehicle station with second-use batteries energy storage system [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(13): 39-45, 55. (in Chinese)



王娟

作者简介：

王娟(1996—)，女，硕士研究生。研究方向：微电网容量配置。E-mail：wjuan0805@163.com。

曾国辉(1975—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：电力电子系统及控制。E-mail：zenggh @sues.edu.cn。

黄勃(1985—)，男，博士，副教授。研究方向：人工智能。E-mail：huangbosues@sues.edu.cn。

刘瑾(1978—)，女，博士，教授。研究方向：智能控制技术。E-mail：flyingpine@sina.com。

(责任编辑：陈国珍)