

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201233

# 考虑运行寿命内经济性最优的梯次电池储能系统 容量配置方法

赵伟<sup>1</sup>, 袁锡莲<sup>2</sup>, 周宜行<sup>3</sup>, 李培强<sup>2</sup>, 雷二涛<sup>1</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 3. 广东电网有限责任公司佛山供电局, 广东 佛山 528000)

**摘要:** 退役动力电池的梯次利用是电动汽车行业可持续发展急需解决的问题。为确保梯次电池储能系统的经济性, 在规划阶段需对储能系统进行容量配置, 提出了基于雨流计数法和等效循环寿命法的梯次电池寿命评估方法。考虑容量保持率变化对储能系统寿命和经济性的影响, 以储能系统实际运行寿命内净收益总和最大为目标, 提出了梯次电池储能系统容量配置方法, 并引入萤火虫算法进行优化求解。算例结果显示, 考虑运行寿命内经济性最优的容量配置方法能够提高梯次电池储能系统的经济性, 同时延长储能系统寿命。

**关键词:** 梯次利用电池; 储能系统; 电池寿命; 容量配置; 萤火虫算法

## Capacity configuration method of a second-use battery energy storage system considering economic optimization within service life

ZHAO Wei<sup>1</sup>, YUAN Xilian<sup>2</sup>, ZHOU Yixing<sup>3</sup>, LI Peiqiang<sup>2</sup>, LEI Ertao<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;  
2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;  
3. Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Foshan 528000, China)

**Abstract:** The second use of a retired battery is an urgent problem needing to be solved for sustainable development of electric vehicles. To ensure the economy of a second-use battery energy storage system, considering the capacity configuration during the planning stages, a method is proposed for predicting the second-use battery service life based on equivalent cycling life and the rain flow counting method. Considering the impact of changes in capacity retention rate on energy storage system life and economy, an optimization model is built for the capacity configuration. This aims at the maximum net present value of total service life. The optimization results are obtained by a firefly algorithm. The results of numerical examples show that the capacity configuration method of the second-use battery storage system considering economic optimization within service life can increase the net present value and extend the life of the energy storage system.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0905305) “Key Technologies for Large-Scale Engineering Application of Second-Use Battery”.

**Key words:** second-use battery; energy storage system; service life; capacity configuration; firefly algorithm

## 0 引言

电动汽车上电池的实际容量衰减到原有容量的70%~80%时需从电动汽车上退役, 若直接报废处理会造成严重的环境污染和资源浪费。而退役动力

电池通过筛选、重组后可用于电网储能等对电池性能要求较低的领域, 可以降低大量电池进入回收期的压力, 同时减小电池储能系统的成本<sup>[1-4]</sup>。在现阶段, 退役动力电池用于储能系统尚有投资成本高、循环寿命有限、不具备规模经济性问题, 因此梯次电池储能系统的容量配置成为规划建设与应用的重要环节。近年来, 相关学者对此开展了一系列的研究。文献[5]针对储能系统参与微网运行的问题,

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助“梯次利用动力电池规模化工程应用关键技术”(2018YFB0905305)

提出了一种以成本最小为优化目标的储能系统容量配置方法,并通过蝙蝠算法进行优化求解。文献[6]将储能系统应用于电网调频中,综合考虑调频效果与经济性两种判定标准,建立了不同目标函数下的储能系统容量配置方法。文献[7]以快速充电站作为动力电池梯次应用场景,以快速充电站年净收益最大为目标对储能系统进行容量优化配置,但该研究假设系统寿命为固定值,也没有考虑电池性能衰减对系统经济性的影响。文献[8]基于层次分析法,研究了基于综合技术经济评估指标的储能容量配置问题,但其配置流程中每个优化运算周期均以年净收益最大为优化目标,不能保证结果的储能系统实际运行寿命内净收益总和最大。文献[9]考虑电池容量衰减,提出了储能系统参与电网一次调频服务的容量配置方法,但该方法中储能系统充放电功率的取值直接受设定的控制策略限制,而其采用的Hooke-Jeeves优化求解方法属于直接搜索法,适用于决策变量较少的优化问题,所以该方法较难同时满足大部分储能系统容量配置问题的条件。综上所述,以经济性作为评定标准,对梯次电池储能系统进行容量配置已有了一定的研究,但是考虑电池容量保持率和循环寿命对经济性的影响,并以系统运行寿命内净收益总和最优为目标进行优化配置,是目前尚未研究的内容。

因此,本文提出一种计及电池循环寿命,并以运行寿命内经济性最优为目标的梯次电池储能系统容量配置方法,使配置结果更加准确合理。根据动力电池的容量退化模型,得到储能系统实际运行寿命的具体计算方法。然后考虑电池容量保持率变化对系统经济性及循环寿命的影响,建立运行寿命内净收益总和最优的容量配置模型。最后引入萤火虫算法对算例进行优化求解,得到梯次电池储能系统的容量优化配置结果,并分析了方法的有效性和优越性。

## 1 容量配置过程中的梯次电池寿命估计

储能电池寿命估计是梯次电池储能系统容量配置的重要环节,对储能系统的运行时间、容量保持率等指标的计算有直接影响。本文考虑储能电池的放电深度(Depth of Discharge, DOD)以及循环次数,采用雨流计数法<sup>[10-12]</sup>和等效循环寿命法<sup>[13-15]</sup>对电池寿命进行估计,并将寿命估计过程融合到之后的储能系统经济性评估以及优化配置计算当中,使得经济性评估及配置结果更为合理。

### 1.1 电池等效循环次数计算

雨流计数法可以根据数据样本的应变-时间之

间的非线性关系,确定数据样本的非周期性循环,并进行循环周期的提取和计数。本文通过雨流计数法,对储能电池的充放电过程进行计算,根据储能电池的荷电状态(State of Charge, SOC)得到相对应的放电深度DOD。

文献[16]通过对某型号磷酸铁锂电池进行测试,得到该种电池放电深度和循环寿命的数据,如表1所示。

表1 某型号磷酸铁锂电池放电深度和循环寿命数据

Table 1 DOD and maximum number of cycles of lithium iron phosphate battery			
放电深度	循环寿命/次	放电深度	循环寿命/次
0.4	7 200	0.8	5 200
0.6	6 000	1	47 00

使用幂函数形式进行拟合,得到放电深度与循环寿命的数学函数关系为

$$N_{\text{cf}}(DOD) = 6380 \cdot DOD^{-0.3614} - 1680 \quad (1)$$

式中: $DOD$ 为磷酸铁锂电池的放电深度; $N_{\text{cf}}(DOD)$ 为磷酸铁锂电池在放电深度为 $DOD$ 时所对应的最大循环次数;式中具体数值为数据拟合得到的结果。

工程中通过实验测得具体类型电池的最大循环次数与定值 $DOD$ 之间的关系。但在实际情况下,蓄电池 $DOD$ 会随系统运行实时变化。本文通过等效循环寿命法,把电池实际运行中不同 $DOD$ 下对应的最大循环次数统一折算成为全充放状态( $DOD=1$ )下的等效循环次数,并求和得到电池在运行周期(即一天)内的等效循环次数 $N'$ 为

$$N' = \sum_{k=1}^n \frac{N_{\text{cf}}(1)}{N_{\text{cf}}(DOD_k)} \quad (2)$$

式中: $n$ 为电池一天的循环周期数; $N_{\text{cf}}(1)$ 为电池在放电深度为100%时所对应的最大循环次数; $N_{\text{cf}}(DOD_k)$ 为电池在放电深度为 $DOD_k$ 时所对应的最大循环次数。

### 1.2 梯次利用电池循环寿命估计

梯次利用电池的寿命可以根据梯次利用开始与结束时规定的电池容量保持率,以及容量保持率随循环次数变化的规律来进行估计。

文献[17]拆解了电动汽车上的退役电池,并对其进行二次循环测试。测试结果显示退役磷酸铁锂电池与新电池对比,并未出现加速衰减的现象,并大致预测出了梯次利用退役电池时梯次电池容量保持率与循环次数的关系为

$$\beta = -2.6043 \times 10^{-5} \cdot N + 0.8347 \quad (3)$$

式中： $\beta$ 为电池容量保持率； $N$ 为梯次电池充放电循环次数；式中具体数值为数据拟合得到的结果。

假设在梯次利用退役电池开始与终止时，电池的容量保持率分别为 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ ，若忽略梯次电池容量保持率变化对等效循环次数计算的影响，可根据式(3)计算得到相对应的电池循环次数 $N_1$ 、 $N_2$ ，则梯次利用电池的寿命 $T$ （单位为年）可由式(4)计算得到。

$$T = \frac{N_2 - N_1}{365 \times N'} \quad (4)$$

式中， $N'$ 为电池在运行周期（即一天）内的等效循环次数， $365 \times N'$ 为电池一年的等效循环次数。

而本文容量配置过程中的梯次利用电池寿命计算，根据式(4)进行了改进。考虑了梯次电池容量保持率逐年变化对等效循环次数计算的影响，在计算过程中每年更新电池的实际容量，进而计算下一年的电池荷电状态等参数，最后通过循环计算得到梯次利用电池寿命。由于循环计算过程难以用公式表达，具体过程见下文经济性评估流程部分。

## 2 容量优化配置模型及求解算法

### 2.1 目标函数

#### 2.1.1 储能系统效益分析

##### 1) 考虑削峰系数的延缓配电网升级投资收益

当配电站或线路负荷超出其额定容量时，传统采用升级或扩建配电线路、变电站等措施对配电网进行升级改造。此类配电网改造方法成本很高，尤其是在城市区域。储能系统可以在负荷高峰时释放电能以满足负荷需求，从而在负荷超出配电线路负载能力时延缓配电网的升级<sup>[18-21]</sup>。

梯次电池储能系统延缓配电网升级改造的年限 $\Delta n$ 为

$$\Delta n = \frac{\log\left(\frac{1}{\lambda}\right)}{\log(1 + \tau)} \quad (5)$$

其中

$$\lambda = \frac{P'_{lm}}{P_{lm}} \quad (6)$$

式中： $\lambda$ 为梯次电池储能系统的削峰系数； $P_{lm}$ 为原负荷曲线峰值； $P'_{lm}$ 为储能系统削峰后的负荷曲线峰值； $\tau$ 为负荷的年增长率。

储能系统因延缓配电网改造产生的总收益为

$$E_1 = C_{inv} \left(1 - \left(\frac{1+i_r}{1+d_r}\right)^{\Delta n}\right) \quad (7)$$

式中： $C_{inv}$ 为电网升级改造所需的一次性投资成本； $i_r$ 为通货膨胀率； $d_r$ 为贴现率。

##### 2) 低储高放套利

在电力市场分时电价的机制下，梯次电池储能系统可以在负荷低谷、电价较低时充电，而在负荷高峰、电价较高时放电，从而降低费用成本，实现经济效益。储能系统在第 $i$ 年运行中，通过低储高放套利产生的效益可由式(8)计算得到。

$$E_{2i} = [n_i \sum_{k=1}^{24} (P_k^+ - P_k^-) e_k] \cdot (1 + R_b)^{-(i-1)} \quad (8)$$

式中： $n_i$ 为储能系统第 $i$ 年运行的天数； $P_k^+$ 和 $P_k^-$ 分别为储能系统第 $k$ 小时段的放电功率和充电功率； $e_k$ 为第 $k$ 小时段的电价； $R_b$ 为基准收益率。

##### 3) 提升电网可靠性收益

本文采用缺电成本，即用户由于供电量不足或断电所造成的经济损失来表示可靠性效益<sup>[22-23]</sup>。梯次电池储能系统可以为电网中无法满足供电量需求的用户供电，从而提高电网的供电可靠性。储能系统在第 $i$ 年运行中，通过提高电网可靠性而产生的效益为

$$E_{3i} = R_{IEA} E_{ENS} \lambda_s [1 - P\{W_k < E_{ENS}\}] \cdot (1 + R_b)^{-(i-1)} \quad (9)$$

其中

$$E_{ENS} = T_s (1 - A_s) P_0 \quad (10)$$

式中： $R_{IEA}$ 为电力用户的缺电损失评价率； $\lambda_s$ 为供电故障率； $E_{ENS}$ 为每次供电不足时用户的电量不足期望值； $T_s$ 为用户每年用电的小时数； $A_s$ 为电网供电的可靠度； $P_0$ 为保证用户用电需求的功率； $P\{W_k < E_{ENS}\}$ 为按小时计算的储能系统在用户缺电时剩余电量小于 $E_{ENS}$ （此时认为储能系统的供电仍不足以支持用户继续生产）的概率。

##### 4) 碳减排效益

我国正大力推行低碳经济，根据国家“十二五”规划，自2013年起已在七省市开展了碳排放权交易试点。碳排放权交易一般是指政府评估出一定区域内满足环境容量的最大碳排放量，并分成若干排放份额后有偿出让给企业。梯次电池储能系统可以减少燃煤火电机组的发电量，降低碳排放<sup>[24-26]</sup>。其在第 $i$ 年运行中，通过碳减排产生的效益为

$$E_{4i} = n_i e_c Q_c \cdot (1 + R_b)^{-(i-1)} \quad (11)$$

式中： $e_c$ 为碳交易价格； $Q_c$ 为典型日碳减排量； $n_i$ 为第 $i$ 年储能系统运行天数。

#### 2.1.2 储能系统成本分析

##### 1) 初始投资成本

梯次电池储能系统的初始投资成本 $C_1$ ，包括主要由电池容量决定的梯次电池成本和主要由功率决定的储能变流器成本两部分，可由式(12)计算。

$$C_1 = C_E E_m + C_P P_m \quad (12)$$

式中:  $C_E$  为梯次电池储能系统单位容量成本;  $E_m$  为储能系统的额定容量;  $C_P$  为储能交直流功率转换单元单位功率成本;  $P_m$  为储能系统的额定功率。

2) 考虑容量保持率变化影响的运行维护成本

梯次电池储能系统在第  $i$  年运行中的运行维护成本  $C_{2i}$ , 主要包括梯次电池的维护成本和储能变流器维护成本两部分, 可由式(13)计算。

$$C_{2i} = (K_{Ei} E_m + K_P P_m) \cdot (1 + R_b)^{-(i-1)} \quad (13)$$

式中:  $K_{Ei}$  为第  $i$  年时运行维护梯次电池的单位容量成本, 其值与梯次电池的容量保持率有关;  $K_P$  为运行维护储能变流器的单位功率成本, 可以认为其值与常规电池储能系统的单位功率成本一致。

运行维护梯次电池的单位容量成本  $K_E$  (单位为万元/MWh) 会随着梯次电池容量保持率的变化而变化。文献[27]以锂离子电池为例子, 得到不同容量保持率的梯次电池对应的运维单位容量成本, 如式(14)所示。

$$K_E = 0.005165 \times \beta^{-6} \quad (14)$$

式中数值为指数函数拟合得到的结果。

本文根据梯次电池当年的容量保持率逐年更新  $K_E$  的值, 从而计算梯次电池储能系统每年的运维成本并求和。

综上, 容量优化配置的目标函数为储能系统实际运行寿命内的净收益总和, 即

$$S = E_1 - C_1 + \sum_{i=1}^{T_{CL}} (E_{2i} + E_{3i} + E_{4i} - C_{2i}) \quad (15)$$

式中,  $T_{CL}$  为储能系统的实际运行寿命。

## 2.2 约束条件

梯次电池储能系统容量优化配置模型的约束条件计及充放电功率约束、充放电守恒约束以及荷电状态约束。其中, 储能系统的荷电状态约束考虑了梯次电池容量保持率逐年变化的影响。

1) 充放电功率约束

$$0 \leq P_k^+ \leq P_m \quad (16)$$

$$0 \leq P_k^- \leq P_m \quad (17)$$

2) 充放电守恒约束

$$\sum_{k=1}^{24} (P_k^+ - P_k^-) = 0 \quad (18)$$

3) 荷电状态约束

$$SOC_{\min} \leq SOC_i(t) \leq SOC_{\max} \quad (19)$$

式中:  $SOC_{\max}$ 、 $SOC_{\min}$  分别为 SOC 的上、下限;  $SOC_i(t)$  为梯次电池在第  $i$  年的荷电状态, 表达式为

$$SOC_i(t) = \frac{E(t)}{E_m} \times \frac{\beta_{START}}{\beta_i} \quad (20)$$

式中:  $\beta_{START}$  为梯次利用退役电池开始时的电池容量保持率;  $\beta_i$  为梯次电池在第  $i$  年时的容量保持率。

## 2.3 经济性评估流程

梯次电池储能系统经济性评估是指在储能系统容量优化配置过程中, 在确定决策变量后对目标函数的计算。储能系统经济性评估流程如图 1 所示。评估方法考虑梯次电池容量保持率逐年下降的情况, 设定梯次利用开始和结束时的容量保持率, 对实际运行寿命内的储能系统进行经济性分析。

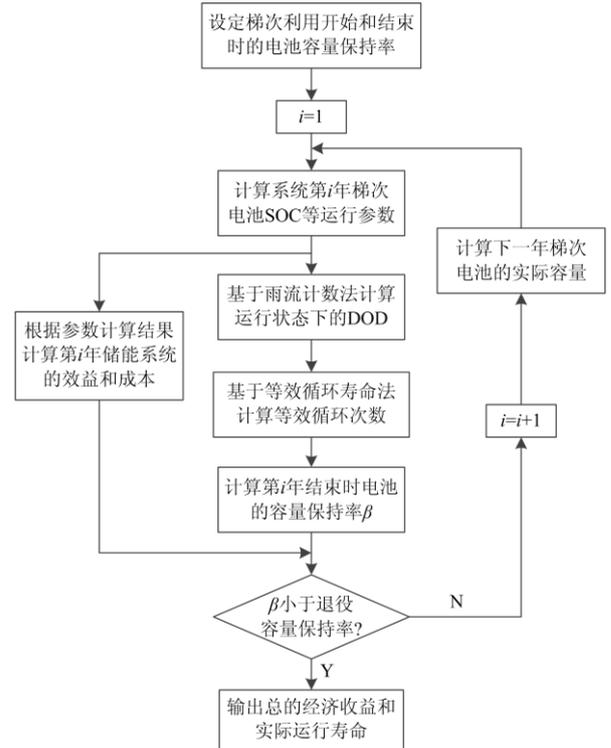


图 1 经济性评估流程图

Fig. 1 Flow chart of economic evaluation

评估流程中, 根据梯次电池储能系统参数和充放电状态, 计算出储能系统当年的经济效益和成本, 并采用雨流计数法和等效循环寿命法得到年末的梯次电池容量保持率。如果容量保持率达到退役条件, 则输出经济性评估的最终结果和系统实际运行寿命  $T_{CL}$ ; 否则根据更新后的系统参数进行下一年的经济性评估计算。

评估过程中根据容量保持率的变化更新储能系统的实际容量, 进而重新计算下一年储能系统的梯次电池荷电状态等相关参数。同步更新储能系统的运行参数, 提高了储能系统实际运行寿命以及经济性评估计算的准确性。

### 2.4 优化求解算法

本文采用萤火虫算法(Firefly Algorithm, FA)对所建的梯次电池储能系统容量优化配置模型进行优化求解。FA是由剑桥学者Yang等<sup>[28]</sup>在2008年提出的一种对自然界中萤火虫群体行为进行模拟和简化的智能优化算法。萤火虫成虫会利用物种特有的闪光信号,通过发光行为进行定位,以此吸引同伴,完成觅食、求偶等群体行为。一般认为,萤火虫的荧光素亮度越高,对其周围同伴的吸引作用越强。而又由于萤火虫的亮度会被空间中的吸光介质所吸收,会随着距离的增加而降低,所以其吸引度受萤火虫间距离所影响。

相比于其他优化求解算法,FA具有多维空间搜索能力强、寻优精度高、调节参数少等优点,因此受到国内外学者的广泛关注,并成功应用于函数优化、路径规划、自动控制等多个领域<sup>[29-31]</sup>。

FA的仿生原理<sup>[32-35]</sup>为:把在搜索空间中生成的多维坐标点模拟成为萤火虫个体,用经济性评估流程得到的储能系统净收益总和模拟个体的位置优劣并确定吸引方向,结合点与点的空间距离得到个体间的吸引度,再将搜索与优化过程模拟为萤火虫间吸引与移动的过程,最后用搜索与优化过程中可行解的选择取代过程模拟个体的优胜劣汰过程。其基本步骤如下:

- 1) 设置萤火虫种群的个体数,并在解空间内随机生成对应数量的萤火虫。
- 2) 确定FA的迭代终止条件。
- 3) 根据上述的梯次电池储能系统经济性评估方法,计算各萤火虫个体的最大萤光亮度 $I_0$ 。
- 4) 根据式(21)计算萤火虫的相对萤光亮度,并通过比较决定萤火虫移动的方向。

$$I = I_0 \times e^{-\gamma \times r_{ij}} \quad (21)$$

式中: $\gamma$ 为光强吸收系数,表示荧光随距离的增大受传播介质吸收而逐渐变弱的特性; $r_{ij}$ 为萤火虫之间的距离。

- 5) 根据式(22)计算萤火虫的吸引度。

$$\beta = \beta_0 \times e^{-\gamma \times r_{ij}} \quad (22)$$

式中, $\beta_0$ 为最大吸引度,表示荧光所在位置的吸引度大小。

- 6) 萤火虫 $i$ 被其他萤火虫吸引而产生移动,更新后的位置为

$$x_i = x_i + \beta \times (x_j - x_i) + \alpha \times \varepsilon \quad (23)$$

式中: $\alpha$ 为步长因子; $\varepsilon$ 为长度在 $[0,1]$ 区间内的随机向量。在萤火虫移动中引入扰动量 $\alpha \times \varepsilon$ 是为了避

免搜索过早地陷入局部最优。

- 7) 判断是否满足迭代的终止条件。若满足,则停止迭代并输出最优结果;否则,转至第3)步进行下一次计算。

采用FA对梯次电池储能系统容量优化配置模型进行求解的步骤如图2所示。

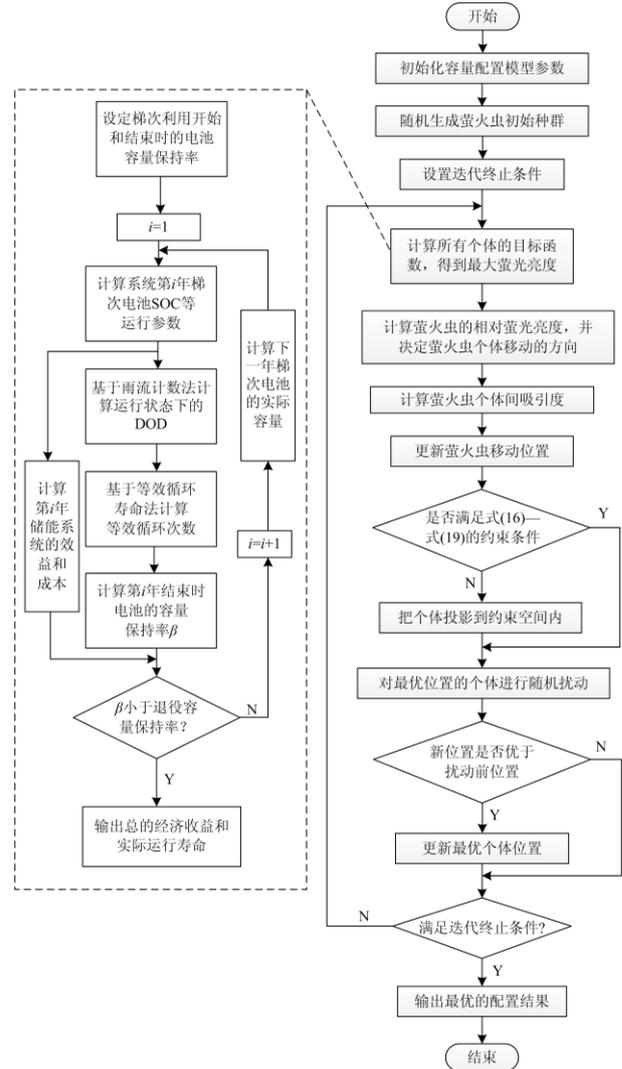


图2 萤火虫算法流程

Fig. 2 Flow chart of firefly algorithm

### 3 算例分析

#### 3.1 参数设定及数据选取

本文以我国南方某地区微网为例,进行计及电池循环寿命的梯次电池储能系统容量配置仿真分析。容量优化配置模型中相关参数设定如表2所示。

典型日负荷曲线如图3所示。设定分时电价,高峰时段:08:00—11:00、13:00—17:00、18:00—21:00,电价为0.1132万元/MWh;平时段:06:00—08:00、11:00—13:00、17:00—18:00、21:00—

22:00, 电价为 0.0683 万元/MWh; 低谷时段:  
02:00—次日 06:00, 电价为 0.0277 万元/MWh。

表 2 参数设定

Table 2 Parameter setting

参数	数值	参数	数值
$C_E$ /(万元/MWh)	180	$\lambda_s$ /(次/年)	0.34
$C_f$ /(万元/MWh)	100	$A_s$	0.99973
$K_p$ /(万元/MWh)	2	$P_o$ /MW	2.5
$R_{IEA}$ /(万元/MWh)	10	$\tau$ /%	1.5
$e_c$ /(万元/MWh)	0.005	$i_t$ /%	1.5
$C_{inv}$ /万元	2500	$d_t$ /%	4.5
$n$ /天	365	$R_b$ /%	5
$T_s$ /h	8760	$[SOC_{min}, SOC_{max}]$	[0.1, 0.9]

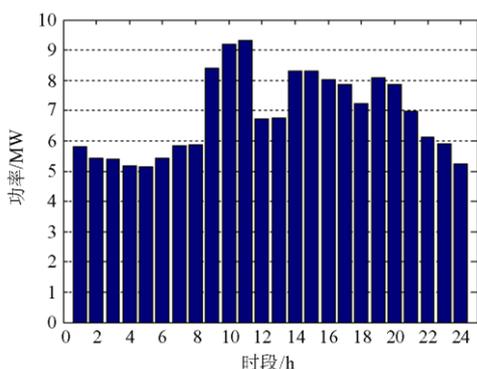


图 3 典型日负荷曲线

Fig. 3 Typical daily load curve

### 3.2 运行寿命内经济性最优的储能系统容量配置

本文设定梯次利用退役电池开始与结束时的电池容量保持率分别为 0.75 和 0.65, 并在优化算法的目标函数中描述了储能系统容量保持率逐年下降的情况。根据储能系统投运当年的 SOC 典型曲线, 使用雨流计数法和等效循环寿命法, 可以计算得到第 2 年年年初的储能系统剩余容量。再根据更新后的系统容量、功率, 计算第 2 年的经济收益、运维成本以及 SOC 运行曲线, 并得到第 3 年年年初的剩余容量。以此循环计算, 直至系统的剩余容量保持率达到退役条件为止。把求和得到的储能系统实际运行寿命内净收益总和作为优化算法的目标函数, 进行优化求解。

算例设定种群规模为 300, 步长因子为 0.2, 吸光系数为 1, 计算最大迭代次数为 100, 搜索精度为  $10^{-6}$ 。通过优化算法求解后得到以下结果: 储能系统最佳额定功率  $P_m = 2.4169$  MW, 额定容量  $E_m = 21.1759$  MWh。储能系统参与前后的负荷曲线如图 4 所示。

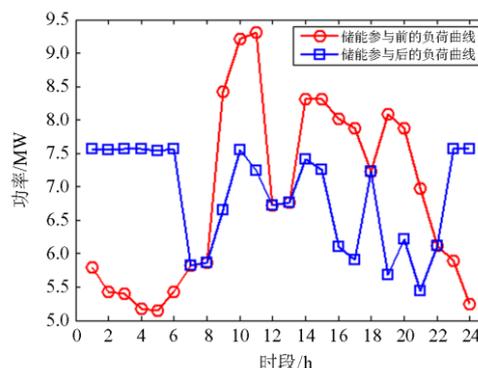


图 4 储能参与前后的负荷曲线

Fig. 4 Synthetic load curve with and without ESS

图 5 为储能系统充放电功率的优化结果曲线, 图 6 为相对应的储能系统 SOC 曲线。

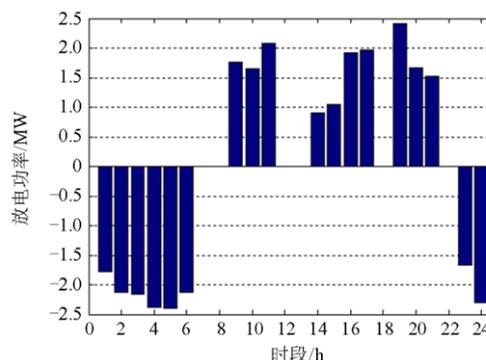


图 5 储能系统充放电功率曲线

Fig. 5 Charge and discharge power curve of ESS

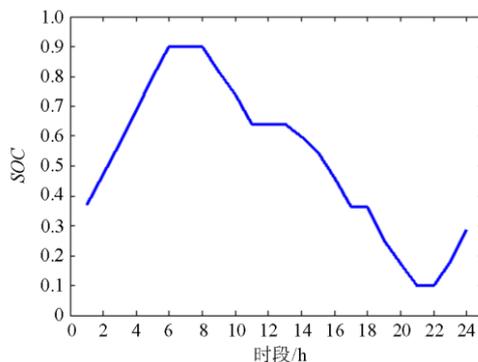


图 6 储能系统 SOC 变化趋势

Fig. 6 Changing trend of SOC of ESS

该梯次电池储能系统的最大净收益为 1766.7 万元, 实际运行寿命为 11.37 年。在该容量配置方法下, 各经济收益部分分别为: (1) 延缓配电网升级投资收益为 838.2 万元; (2) 低储高放套利收益为 4724.9 万元; (3) 提升电网可靠性收益为 142.2 万元; (4) 碳减排效益为 165.8 万元。而各经济成本部

分分别为：(1) 初始投资成本为 4 053.4 万元；(2) 运行维护成本为 51.1 万元。结果显示，低储高放套利在收益部分占比最高，为总体经济收益的 80.48%；其次为延缓配电网升级投资收益，占总体经济收益的 14.28%。

### 3.3 与以年净收益为目标的容量配置结果对比

本文对梯次电池储能系统的容量优化配置模型进行求解时，考虑了电池的循环寿命，以储能系统实际运行寿命内净收益总和作为目标函数，提高了容量配置方法的合理性，实现系统目标的最优。

为了验证本文方法的有效性，通过对不考虑储能系统运行寿命而以一年内净收益为目标函数的容量配置模型进行优化求解，再根据优化结果计算其实际运行寿命内净收益总和，并与本文的优化结果作出比较。以年净收益最大为目标容量配置方法求解后得到以下结果：储能系统额定功率  $P_m = 2.0532 \text{ MW}$ ，额定容量  $E_m = 17.6289 \text{ MWh}$ 。该梯次电池储能系统的净收益为 1 019.4 万元，实际运行寿命为 8.52 年。结果显示，相比本文方法的优化结果，以年净收益最大为目标的优化求解方法得到的储能系统净收益降低了 747.3 万元，偏差达到 42.29%。

两种方法的优化结果所对应的储能系统典型充放电功率曲线如图 7 所示。对比储能系统充放电功率曲线可以看出，以年净收益最大为目标的优化结果对分时电价的变化更为敏感，储能系统的充放电更为频繁。这一方面是因为低储高放套利在整体经济收益部分占比较高，使得优化结果受电价变化影响较大；另一方面是因为如果只是以年净收益最大为目标，会忽略电池循环寿命对经济性的影响，这加强了电价变化对结果的影响，使得储能系统充放电更为频繁，从而会降低储能系统的运行寿命。

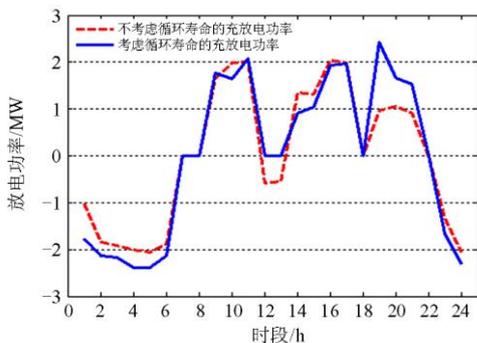


图 7 考虑循环寿命前后的储能系统充放电功率曲线

Fig. 7 Charge and discharge power curve of ESS considering and without considering cycle life

两种方法分别求解得到的储能系统 SOC 典型曲线对比如图 8 所示。两种方法优化结果对应的储

能系统梯次电池容量保持率变化曲线如图 9 所示。由储能系统 SOC 曲线对比图可以看出，本文方法以储能系统实际运行寿命内净收益总和最大为目标，同时兼顾了年经济收益和寿命所带来的影响，优化结果的荷电状态变化趋势更为平缓，这使得储能系统的放电深度相对更浅。梯次电池容量保持率变化曲线对比图则说明了本文优化结果的储能电池容量保持率下降速度更慢，有效延长了储能系统的实际运行寿命，从而获得更高的净收益，实现系统目标的最优。

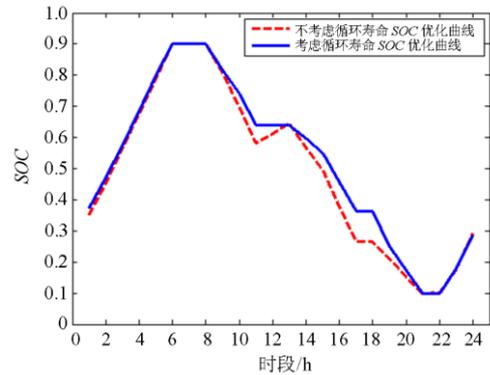


图 8 考虑循环寿命前后的储能系统 SOC 曲线  
Fig. 8 SOC curves of ESS considering and without considering cycle life

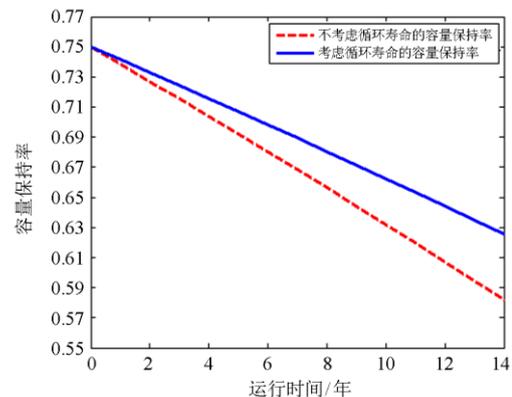


图 9 考虑循环寿命前后的储能系统容量保持率  
Fig. 9 Capacity retention rate of ESS considering and without considering cycle life

## 4 结论

1) 所构建的储能成本-效益计算模型能较好地诠释梯次电池储能系统在削峰填谷场景中的收益，能够为储能容量配置提供一定的支撑；

2) 所提出的容量配置优化模型考虑了电池容量保持率衰减对梯次电池储能系统运行维护成本、

经济效益以及实际运行寿命的影响,有效提高了寿命评估和经济性评估的准确性;

3) 仿真结果验证了本文容量配置方法的可行性以及与以年净收益为目标的容量配置方法对比的优势,验证了本文方法能有效提高储能系统容量配置的经济性和系统寿命,为梯次电池储能系统的投资提供规划依据。

## 参考文献

- [1] NEUBAUER J, SMITH K, WOOD E, et al. Identifying and overcoming critical barriers to widespread second use of PEV batteries[R]. United States: National Renewable Energy Lab (NREL), 2015.
- [2] VISWANATHAN V V, MICHAEL K M. Second use of transportation batteries: maximizing the value of batteries for transportation and grid services[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(7): 2963-2970.
- [3] 刘念, 唐霄, 段帅, 等. 考虑动力电池梯次利用的光伏换电站容量优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 34-44, 6.  
LIU Nian, TANG Xiao, DUAN Shuai, et al. Capacity optimization method for PV-based battery swapping stations considering second-use of electric vehicle batteries[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 34-44, 6.
- [4] 李建林, 修晓青, 吕项羽, 等. 储能系统容量优化配置及全寿命周期经济性评估研究综述[J]. 电源学报, 2018, 16(4): 1-13.  
LI Jianlin, XIU Xiaoqing, LÜ Xiangyu, et al. Review on capacity optimization configuration and life cycle economic evaluation method for energy storage system[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(4): 1-13.
- [5] BAHMANI-FIROUZI B, AZIZIPANAH-ABARGHOEE R. Optimal sizing of battery energy storage for micro-grid operation management using a new improved bat algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 56(3): 42-54.
- [6] 刘勤, 魏明奎, 周全, 等. 计及电量成本和系统自供电可靠性的西南地区微电网容量优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 139-145.  
LIU Qin, WEI Mingkui, ZHOU Quan, et al. Research on the optimal configuration of microgrid capacity in southwest china considering electricity cost and system self-supply reliability[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 139-145.
- [7] 韩晓娟, 张姝, 修晓青, 等. 配置梯次电池储能系统的快速充电站经济性评估[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(4): 514-521.  
HAN Xiaojuan, ZHANG Hua, XIU Xiaoqing, et al. Economic evaluation of fast charging electric vehicle station with second-use batteries energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(4): 514-521.
- [8] 季宇, 熊雄, 寇凌峰, 等. 基于经济运行模型的储能系统投资效益分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 143-150.  
JI Yu, XIONG Xiong, KOU Lingfeng, et al. Energy storage system investment benefit analysis based on economic operation model[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 143-150.
- [9] 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.
- [10] YAN G, LIU D, LI J, et al. A cost accounting method of the Li-ion battery energy storage system for frequency regulation considering the effect of life degradation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 43-51. DOI: 10.1186/s41601-018-0076-2.
- [11] YOU S, RASMUSSEN C N. Generic modelling framework for economic analysis of battery systems[C] // IET Conference on Renewable Power Generation, September 6-8, 2011, Edinburgh, UK.
- [12] 孙钰, 袁强, 温小飞, 等. 基于雨流计数法及 Corten Dolan 准则的轴承疲劳寿命预测[J]. 船舶工程, 2020, 42(1): 68-73.  
SUN Yu, YUAN Qiang, WEN Xiaofei, et al. Bearing fatigue life prediction based on rain flow counting method and Corten Dolan criterion[J]. Ship Engineering, 2020, 42(1): 68-73.
- [13] 李凯, 马倩, 徐红兵, 等. 储能系统的荷电状态管理策略及其影响评价[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 27-32.  
LI Kai, MA Qian, XU Hongbing, et al. The state-of-charge management strategy of energy storage system and its impact evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 27-32.
- [14] 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, 16.  
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, 16.
- [15] SCHALTZ E, KHALIGH A, RASMUSSEN P O. Influence of battery/ultra-capacitor energy-storage sizing on battery lifetime in a fuel cell hybrid electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(8): 3882-3891.
- [16] 李文超, 童亦斌, 张维戈. 计及电池使用寿命的电动汽车充电站储能容量配置方法[J]. 电工电能新技术, 2019, 39(4): 55-63.  
LI Wenchao, TONG Yibin, ZHANG Weige. Energy storage capacity allocation method of electric vehicle charging station considering battery life[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 39(4): 55-63.
- [17] 李建林, 修晓青, 刘道坦, 等. 计及政策激励的退役动力电池储能系统梯次应用研究[J]. 高电压技术, 2015,

- 41(8): 2562-2568.
- LI Jianlin, XIU Xiaoqing, LIU Daotan, et al. Research on second use of retired electric vehicle battery energy storage system considering policy incentive[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2562-2568.
- [18] 张金国, 焦东升, 王小君, 等. 基于梯级利用电池的储能系统经济运行分析[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2551-2555.
- ZHANG Jinguo, JIAO Dongsheng, WANG Xiaojun, et al. Analysis on economic operation of energy storage based on second-use batteries[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2551-2555.
- [19] CHACRA F A, BASTARD P, FLEURY G, et al. Impact of energy storage costs on economical performance in a distribution substation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 684-691.
- [20] 施泉生, 郭良合, 张孝君. 综合考虑多主体经济效益的分布式电源优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 85-91.
- SHI Quansheng, GUO Lianghe, ZHANG Xiaojun. Research on optimal configuration of distributed power generation considering multi-agent economic benefits[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 85-91.
- [21] 修晓青, 李建林, 惠东. 用于电网削峰填谷的储能系统容量配置及经济性评估[J]. 电力建设, 2013, 34(2): 1-5.
- XIU Xiaoqing, LI Jianlin, HUI Dong. Capacity configuration and economic evaluation of energy storage system for grid peak load shifting[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(2): 1-5.
- [22] 张焰. 电网规划中的可靠性成本-效益分析研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(15): 33-36.
- ZHANG Yan. Research on cost-benefit analysis of electric power network reliability planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(15): 33-36.
- [23] 颜志敏, 王承民, 郑健, 等. 配电网中蓄电池储能系统的价值评估模型[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 57-61.
- YAN Zhimin, WANG Chengmin, ZHENG Jian, et al. Value assessment model of battery energy storage system in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 57-61.
- [24] 修晓青, 唐巍, 李建林, 等. 计及电池健康状态的源储荷协同配置方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 3118-3126.
- XIU Xiaoqing, TANG Wei, LI Jianlin, et al. Collaborative configuration of distributed generation, energy storage and load in microgrid considering state of health[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 3118-3126.
- [25] 罗凤章. 并网光伏发电工程的低碳综合效益分析模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 163-169.
- LUO Fengzhang. Low carbon comprehensive benefit analysis model of grid connected photovoltaic power generation project[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 163-169.
- [26] 张雷, 刘颖琦, 张力, 等. 中国储能产业中动力电池梯次利用的商业价值[J]. 北京理工大学学报: 社会科学版, 2018, 20(6): 34-44.
- ZHANG Lei, LIU Yingqi, ZHANG Li, et al. The commercial value of cascade utilization of power batteries in China's energy storage industry[J]. Journal of Beijing Institute of Technology: Social Sciences Edition, 2018, 20(6): 34-44.
- [27] 刘大贺, 韩晓娟, 李建林. 基于光伏电站场景下的梯次电池储能经济性分析[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6): 27-31, 77.
- LIU Dahe, HAN Xiaojuan, LI Jianlin. Economic analysis of echelon battery energy storage based on artificial fish swarm algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6): 27-31, 77.
- [28] YANG Xinshe. Nature-inspired metaheuristic algorithms[M]. Frome: Luniver Press, 2008: 83-96.
- [29] BAYKASOĞLU A, OZSOYDAN F B. Adaptive firefly algorithm with chaos for mechanical design optimization problems[J]. Applied Soft Computing, 2015, 36: 152-164.
- [30] LIU C, GAO Z, ZHAO W. A new path planning method based on firefly algorithm[C] // 2012 Fifth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, June 23-26, 2012, Harbin, China: 775-778.
- [31] COELHO S, MARIANI V C. Firefly algorithm approach based on chaotic Tinkerbell map applied to multivariable PID controller tuning[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2012, 64(8): 2371-2382.
- [32] 戴璐平, 吴薇, 黄蓓雯. 考虑不确定性的分布式家庭并网光伏系统鲁棒优化能量调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 48-55.
- DAI Luping, WU Wei, HUANG Beiwen. Robust optimal energy dispatch for distributed home grid-connected photovoltaic systems considering uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 48-55.
- [33] SHIMELS G H, ENGIDA W D, MOHD H F. A firefly algorithm based hybrid method for structural topology optimization[J]. Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, 2020, 7(1).
- [34] YANG Xinshe, DEB S. Eagle strategy using levy walk and firefly algorithms for stochastic optimization[J]. Study in Computational Intelligence, 2010, 284: 101-111.
- [35] 刘长平, 叶春明. 一种新颖的仿生群智能优化算法: 萤火虫算法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(9): 3295-3297.
- LIU Changping, YE Chunming. Novel bioinspired swarm intelligence optimization algorithm: firefly algorithm[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(9): 3295-3297.

收稿日期: 2020-10-13; 修回日期: 2020-01-22

作者简介:

赵伟(1981—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电动汽车与储能技术; E-mail: zh\_solar@126.com

袁锡莲(1995—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为储能在电力系统中的应用。E-mail: 1172756746@qq.com

(编辑 魏小丽)