

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240189

计及功能性衰减的独立运营模式下电化学储能容量配置研究

于娜¹, 吴钰豪¹, 黄大为¹, 崔晗², 张志鹏³, 孔令国¹

(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. 国网吉林省电力有限公司计量中心, 吉林 长春 130021; 3. 国网吉林省电力有限公司经济技术研究院, 吉林 长春 130000)

摘要: 电化学储能(electrochemical energy storage, EES)内部的多种功能性老化行为是影响 EES 规划决策以及经济性评估的重要因素。针对独立运营模式下 EES 同时参与电能量和调频市场的容量配置问题, 首先提出计及功能性衰减的 EES 两阶段容量优化配置决策模型。第一阶段模型以 EES 期望寿命周期内收益最大化为目标进行 EES 容量优化配置; 第二阶段模型考虑 EES 寿命和功能性老化行为约束, 以日运行利润最大化为目标优化各运行年内 EES 运营决策。然后采用多参数规划理论方法对两阶段模型进行联合优化求解, 以获得独立运营模式下 EES 的配置容量及其期望寿命。最后通过算例仿真分析了 EES 的功能性老化行为对其经济寿命及容量配置的影响, 验证了所提模型和方法的有效性。

关键词: 储能规划; 电化学储能; 两阶段决策; 电池老化; 功能性衰减

Electrochemical energy storage capacity configuration in an independent operational mode considering functional decay

YU Na¹, WU Yuhao¹, HUANG Dawei¹, CUI Han², ZHANG Zhipeng³, KONG Lingguo¹

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation Control & Green Power New Technology of Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China; 2. Center of Measurement of State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130021, China; 3. Power Economic Research Institute of State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130000, China)

Abstract: The various functional aging behaviors within electrochemical energy storage (EES) are important factors affecting EES planning decisions and economic evaluations. First, a two-stage capacity optimization decision model for EES is proposed considering functional decay to address the capacity allocation issue of EES participating in both the electrical energy and frequency modulation markets in an independent operational mode. The first stage model optimizes the allocation of EES capacity with the goal of maximizing benefits within the expected life cycle of the EES; the second stage model optimizes the EES operational decisions within each operating year with the goal of maximizing daily operating profit considering the constraints of EES lifespan and functional aging behavior. Then, the configuration capacity and expected lifespan of EES in an independent operational mode is obtained using the multi-parameter programming theory method to jointly optimize and analyze the two-stage model. Finally, the impact of functional aging behavior of EES on its economic life and capacity configuration is analyzed through numerical simulation and the effectiveness of the proposed model and method is verified.

This work is supported by the National Key R & D Program of China (No. 2018YB1503101).

Key words: energy storage planning; electrochemical energy storage; two-stage decision-making; battery degradation; functional decay

0 引言

电化学储能(electrochemical energy storage, EES)

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YB1503101);
国家自然科学基金项目资助(51307019)

作为一种新兴的产业, 在世界电力调频辅助服务市场和电能量市场得到了越来越广泛的认可^[1-3]。借助独立运营的模式, EES 可作为独立市场主体同时参与电能量和调频辅助服务市场交易^[4-5]。相较于传统火电机组, 利用 EES 参与电网调频调峰的显著优势在于其快速的响应能力、较高的响应精度以及可实

现对能量时空转移的能力^[6-7]。因此,通过合理配置 EES 系统可以有效提升电力系统频率的稳定性以及电网整体的经济性^[8-10]。

考虑到目前技术条件下 EES 的电化学材料特性, EES 运行中频繁的充放电行为会严重影响 EES 的循环寿命及其在当前运行状态下的功能性(functionality)^[11]。现有研究表明, EES 功能性的老化行为主要受自身运行过程中充放电速率、充放电深度(depth of discharge, DOD)、温度和储能电荷状态(state of charge, SOC)的影响^[12-13], 其中, EES 的功能性老化行为主要包含电池的能量容量、功率容量以及能量转化效率的衰减。随着 EES 系统的大规模安装与运行, EES 的寿命和功能性老化行为对储能系统的容量配置以及经济性的影响日益增大, 忽略 EES 的寿命或功能性任一老化行为均会导致对 EES 配置的经济性分析结果过于乐观。

为了能够得到储能在不同运行时长下的寿命和功能性衰减程度, 对 EES 的老化行为进行准确建模变得至关重要。在针对 EES 老化行为的建模方法中, 文献[14]根据测得的实验结果, 对电池的衰减数据进行拟合从而得出电池的寿命衰减模型。文献[15]采用了基于深度神经网络的估算方法建立了锂离子电池关于 SOC、DOD 和运行温度的电池循环寿命精确计算模型, 但该建模过程较为复杂, 难以应用于储能的优化配置当中。文献[16]通过计算各时段内由充放电行为决定的半循环周期以分析 EES 由每个时段运行所造成的循环老化, 从而简化计算复杂度。文献[17]通过估算电池的健康状态(state of health, SOH)得到电池的剩余可用寿命, 并建立了电池的能量转化效率以及功率的衰减模型, 但其寿命衰减模型和功能性衰减模型并未采用统一量纲。由上述不同建模方法可见, 当前针对 EES 的老化行为建模大多未考虑 EES 的功能性老化行为, 且其中部分模型的建立过程及表达式过于复杂因此难以应用于储能系统的规划层面。

考虑到目前 EES 系统的能量容量和功率容量配置成本均相对高昂^[18], 其寿命和功能性的衰减程度又直接受储能运行状态的影响, 因此储能电站需要在满足一定日运营经济性的同时, 将 EES 的寿命和功能性老化行为作为影响 EES 容量配置的指标因素, 以此改善运营策略以提升储能系统在全寿命周期内的整体经济性。文献[19]将储能的循环寿命作为储能运行的约束条件, 建立了计及不确定性的两阶段鲁棒优化模型。文献[20-21]基于市场机制建立了储能同时参与多应用场景的运营与配置双层优

化模型。文献[22]提出一种基于运营策略的储能容量配置方法, 在确保区域具有一次调频能力的同时提高储能的经济性。文献[23]考虑了储能电池退役后的可利用性, 设计了针对电池不同的 SOH 状态下的储能运营策略, 以提高储能容量配置的经济性。上述关于 EES 容量配置的研究通常只将 EES 的寿命老化行为纳入优化模型中, 并未考虑 EES 功能性老化行为对储能容量配置的影响, 由于功能性老化行为的存在, EES 的能量容量、功率容量以及能量转化效率等参数在其全寿命周期内逐年衰减, 在此情况下, EES 全寿命周期内的经济寿命^[17]将不再是固定值, 在储能配置研究中未考虑该问题会错估储能的盈利能力, 并对储能系统的容量配置优化产生不利影响。

本文针对独立运营模式下 EES 的容量配置问题, 以锂电池为例提出一种同时计及寿命和功能性衰减的两阶段 EES 容量优化配置决策模型。首先基于全循环等效寿命衰减分析方法, 建立以全循环等效充放电次数为唯一决策变量的 EES 多重功能性衰减模型。考虑 EES 同时参与电能量市场和调频辅助服务市场的运营场景, 第一阶段优化模型以 EES 期望寿命周期内的收益净现值最大化为目标, 反映 EES 期望寿命周期经济性最优, 通过运行年所确定的实际能量容量、功率容量和能量转化效率, 来反映功能性衰减对 EES 运营利润的影响; 第二阶段优化模型以最大化 EES 日运营利润为目标, 反映 EES 同时参与电能量和调频市场运营利润, 进而影响第一阶段优化模型中的期望寿命周期的利润指标。将上述两阶段优化决策模型视为多参数规划问题, 以第一阶段优化模型的 EES 容量和期望寿命作为待优化参数, 构建求解算法, 通过算例分析验证了所提模型和方法的有效性。

1 全循环等效功能性衰减模型

1.1 等效寿命衰减模型

EES 运行会导致自身寿命的损耗, 按照不同的老化影响因素可将 EES 寿命损耗类型分为日历老化和循环老化^[24]。其中, 日历老化主要受 EES 温度和 SOC 影响, 在本文中, EES 面向的应用场景为响应电网侧的二次调频以及参与电能量市场套利, EES 受日历老化造成的寿命损耗可等价为其每日能量损耗的一个固定值^[25]; 循环老化取决于 EES 每日的充放电行为, 可表示为如式(1)所示的关于充放电深度的函数。

$$N_d^{\text{fail}} = N_{100}^{\text{fail}} \cdot d^{-k_p} \quad (1)$$

式中: N_d^{fail} 为 EES 在放电深度 d 下达到寿命终点时的循环次数; N_{100}^{fail} 为 EES 在 100% 放电深度下可循环的总次数; k_p 为曲线拟合参数, N_{100}^{fail} 和 k_p 均为 EES 出厂时的固定值, 本文设 k_p 取值为 1^[25]。

为了能方便且有效地计算 EES 在期望寿命周期内不同阶段时的循环老化值, 将 EES 在运行过程中产生的不同深度的充放电循环均折算成一定比例的 100% 放电深度下的循环次数。将式(1)转化为关于 EES 全循环等效充放电次数 N_{100}^{eq} 的函数, 如式(2)所示。

$$N_{100}^{\text{eq}} = N_d \cdot d^{-k_p} \quad (2)$$

式中, N_d 为 EES 在放电深度 d 下的累计循环次数。

将 EES 每次的充放电循环进一步拆分为充电半循环和放电半循环。考虑到本文中 EES 面向的应用场景为响应电网侧的二次调频以及参与能量市场套利, 则运行 t 时段 EES 的第 k 次充电或放电深度 $d_{t(k)}^{\text{half}}$ 可表示为

$$\begin{cases} d_{t(k)}^{\text{half}} = \frac{[P_{t(k)}^{\text{EES}} - P_t^e \cdot (t_{t(k)}^{\text{min}} - t_{t(k)}^{\text{max}})/h] \cdot \mu_t \cdot \eta_n}{E_n^{\text{EES}}}, & P_{t(k)}^{\text{EES}} > 0 \\ d_{t(k)}^{\text{half}} = \frac{[P_{t(k)}^{\text{EES}} + P_t^e \cdot (t_{t(k)}^{\text{max}} - t_{t(k)}^{\text{min}})/h] \cdot \mu_t / \eta_n}{E_n^{\text{EES}}}, & P_{t(k)}^{\text{EES}} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{t(k)}^{\text{EES}}$ 为 EES 在 t 时段内灵活跟踪电网第 k 次 AGC 指令的实际出力; P_t^e 为 t 时段 EES 在能量市场的日前申报容量; η_n 、 E_n^{EES} 分别为 EES 在第 n 个运行年内的能量转化效率与能量容量; $t_{t(k)}^{\text{min}}$ 为 EES 在经过第 k 次放电之后达到能量状态最低值时所处的时刻; $t_{t(k)}^{\text{max}}$ 为 EES 在经过第 k 次充电之后达到能量状态最高值时所处的时刻; h 为时间间隔, 本文取值为 1 h; μ_t 为 EES 自放电损耗系数。

基于式(3), EES 全循环等效的日累积充放电次数 N_{100}^{day} 可表示为

$$N_{100}^{\text{day}} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{k=1}^{K_t} 0.5 \cdot (d_{t(k)}^{\text{half}})^{k_p} \quad (4)$$

式中, K_t 为 EES 在运行 t 时段内的总充放电次数。

本文通过约束 EES 全循环等效的日累积充放电次数 N_{100}^{day} 以确保其可运行至已规划的期望寿命。

EES 的期望寿命 T 可表示为

$$T = \frac{N_{100}^{\text{fail}}}{W \cdot N_{100}^{\text{day}}} \quad (5)$$

式中, W 为 EES 每年可运行天数。

1.2 功能性衰减模型构建

EES 随着运行时间的不断增加, 自身的功能性会随着其寿命的衰减而减弱, 包括 EES 的功率容量、能量容量和能量转化效率, 导致 EES 功能性衰减的主要原因是由于其内部各种老化机制的交互作用, 其中 EES 内部阻抗不可逆的增加是导致其容量衰减以及效率降低的主要因素^[26]。

以锂电池为例, 当前研究表明, 锂电池在其寿命周期内, 自身的能量转化效率将由原来的 90%~95% 降至 80%~85%, 而其功率容量的衰减程度可达到 50%^[17]。如图 1 所示。

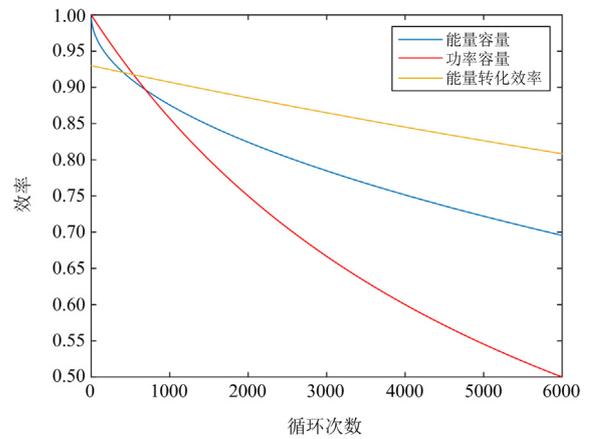


图 1 锂电池功能性衰减曲线

Fig. 1 Lithium battery functionality attenuation curve

本文依据现有研究成果, 根据锂电池功率容量、能量转化效率与其充放电时的端电压 U 、电流 I 以及内阻 Z 之间的关系, 建立在运行状态下锂电池功率容量和能量转化效率关于自身内阻 Z 以及健康状态 SOH 的衰减状态模型。随后基于 1.1 节全循环等效寿命衰减模型, 推导以全循环等效次数为唯一决策变量的锂电池功率容量、能量容量和能量转化效率的多重功能性衰减模型。

首先, 给出锂电池能量转化效率状态模型表达式如式(6)所示。

$$\begin{cases} \eta_n = \frac{UI}{UI + I^2 Z_n} = \frac{1}{1 + Z_n \frac{1}{U}} \\ \eta_0 = \frac{1}{1 + Z_0 \frac{1}{U}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: Z_n 为锂电池运行至第 n 个运行年的内阻; Z_0 、 η_0 分别为锂电池初始内阻、能量转化效率。进一步可得到能量转化效率 η_n 关于内阻 Z_n 的函数关系, 如

式(7)所示。

$$\eta_n = \frac{1}{1 + \frac{Z_n}{Z_0} \cdot \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}} \quad (7)$$

锂电池第 n 个运行年的功率容量 P_n^{EES} 关于内阻 Z_n 的函数关系推导过程与上述过程类似, 即

$$P_n^{\text{EES}} = \frac{Z_0}{Z_n} \cdot P_0^{\text{EES}} \quad (8)$$

式中, P_0^{EES} 为锂电池出厂时的额定功率容量值。

研究表明, 锂电池随运行时间的变化, 其自身内阻与 SOH 状态呈现一定的线性关系^[23], 具体函数表达如式(9)所示。

$$Z_n = Z_0 + \frac{\bar{S} - S_n}{\bar{S} - \underline{S}} \cdot (Z_{\text{fail}} - Z_0) \quad (9)$$

式中: S_n 为锂电池运行到第 n 年时的 SOH 状态; \bar{S} 、 \underline{S} 分别为锂电池出厂时、锂电池宣告退役时的 SOH 值, 通常认定当锂电池 SOH 值降至出厂时 70% 即可宣告电池退役^[25]; Z_{fail} 为锂电池宣告退役时的内阻值, 通常认定当锂电池内阻达到出厂时的 200% 时, 即宣告该电池退役^[27]。

由锂电池全循环等效寿命损耗模型可知, 将锂电池功率容量和效率的等效全循环次数衰减模型表示为

$$\begin{cases} P_n^{\text{EES}} = \frac{N_{100}^{\text{fail}}}{N_{100}^{\text{eq},n} + N_{100}^{\text{fail}}} \cdot P_0^{\text{EES}} \\ \eta_n = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot N_{100}^{\text{eq},n}}{N_{100}^{\text{fail}}} \cdot \frac{1 - \eta_0}{\eta_0}} \cdot \eta_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $N_{100}^{\text{eq},n}$ 为锂电池运行到第 n 年时所累积的等效循环次数。

由于充放电倍率对锂电池能量容量衰减的影响较小, 且锂电池衰减速率不与其倍率呈简单的正相关^[28], 分析充放电深度对锂电池能量容量衰减的影响, 本文采用经验建模方法, 选择基于 Arrhenius 方程的 Wang 模型对锂电池能量容量的等效全循环衰减模型进行构建, 得到锂电池能量容量的等效全循环衰减模型 E_n^{EES} , 如式(11)所示。

$$E_n^{\text{EES}} = 1 - \gamma \cdot e^{\frac{-4345}{\omega}} \cdot (N_{100}^{\text{eq},n})^{0.5} \quad (11)$$

式中: ω 为锂电池运行时所处的温度, 本文假定锂电池温度为恒定值; γ 为由电池充放电深度所决定的拟合系数, 该系数与锂电池充放电深度的关系可由一个三阶多项式方程进行描述^[28], 如式(12)所示。

$$\gamma = -0.002315 \cdot d^3 + 1.071 \cdot d^2 - 27.49 \cdot d + 8473 \quad (12)$$

基于式(12), 引入 1.1 节的全循环等效概念, 即可将此关于充放电深度的函数转化为一个常数。

2 EES 容量优化配置决策

EES 容量配置的优化目标为 EES 期望寿命周期的经济性最优。考虑到 EES 在容量配置、期望寿命值与日运营策略之间的内在关联性, 本节建立计及循环寿命和功能性衰减的 EES 配置两阶段决策模型, 其框架如图 2 所示。

第一阶段优化模型, 以 EES 期望寿命周期内的收益净现值最大为目标, 反映 EES 期望寿命周期经济性最优, EES 期望寿命、能量容量及功率容量均为决策变量。

第二阶段优化模型, 以最大化 EES 日运营利润为目标, 反映独立运营模式下 EES 同时参与电能量和调频市场运营利润。两个阶段的优化模型, 通过 EES 全循环等效寿命和功能性衰减模型约束进行耦合, 即第一阶段优化模型中的期望寿命确定的第 n 年实际功率容量、能量容量以及能量转化效率, 并以约束条件的形式制约第二阶段运营优化模型的运营利润。

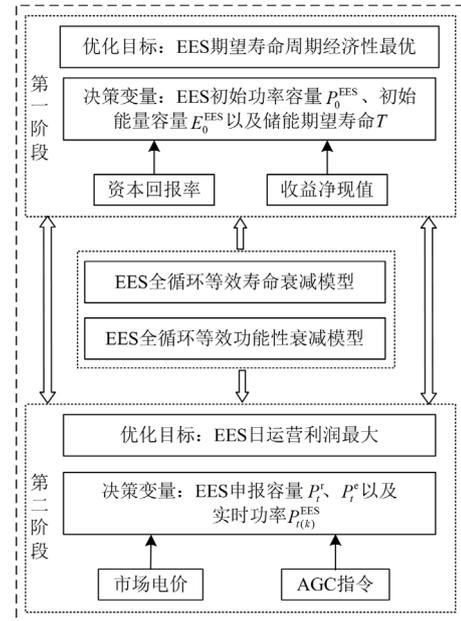


图 2 储能规划两阶段模型架构

Fig. 2 Two-stage model architecture for energy storage planning

2.1 第一阶段模型

2.1.1 目标函数

第一阶段模型的优化目标为最大化储能期望寿命周期内的收益净现值, EES 期望寿命周期内总收益 F_T^{total} 表示为

$$F_T^{\text{total}} = \sum_{n=1}^T F_n^{\text{day}}(E_n^{\text{EES}}, P_n^{\text{EES}}) \cdot W \cdot \frac{1}{(1+r)^n} \quad (13)$$

式中: F_n^{day} 为 EES 在第 n 年内的日运营收益; E_n^{EES} 和 P_n^{EES} 分别为第 n 年内 EES 的能量容量和功率容量实际值; r 为贴现率。本文假设 EES 配置的初始功率容量 P_0^{EES} 与初始能量容量 E_0^{EES} 逐年衰减, 可按 1.2 节模型计算 E_n^{EES} 和 P_n^{EES} 。

EES 初始投资成本 C_T^{inv} 可表示为

$$C_T^{\text{inv}} = (C^{\text{P}} \cdot P_0^{\text{EES}} + C^{\text{E}} \cdot E_0^{\text{EES}} + C^{\text{F}}) \cdot T \cdot \frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1} \quad (14)$$

式中: C^{P} 为 EES 单位功率投资成本; C^{E} 为 EES 单位容量投资成本; C^{F} 为 EES 电站建设成本。

EES 第一阶段目标函数表示为

$$\max F = F_T^{\text{total}} - C_T^{\text{inv}} \quad (15)$$

式中, F 为 EES 在期望寿命周期内的收益净现值。

2.1.2 约束条件

第一阶段模型约束为

$$\begin{cases} E_{\min}^{\text{EES}} \leq E_0^{\text{EES}} \leq E_{\max}^{\text{EES}} \\ P_{\min}^{\text{EES}} \leq P_0^{\text{EES}} \leq P_{\max}^{\text{EES}} \\ T_{\min} \leq T \leq T_{\text{float}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: E_{\max}^{EES} 、 E_{\min}^{EES} 分别为 EES 额定能量容量配置的上、下限值; P_{\max}^{EES} 、 P_{\min}^{EES} 分别为 EES 额定功率容量配置的上、下限值; T_{\min} 为 EES 的最小期望寿命; T_{float} 为 EES 的浮充寿命, 即 EES 始终处于闲置状态下的可用寿命, 通常可将 EES 的浮充寿命假定为 EES 的最大可用寿命^[16]。

2.2 第二阶段模型

2.2.1 目标函数

第二阶段模型的优化目标为最大化 EES 在第 n 年内参与电能量和调频辅助服务市场的日运营利润 F_n^{day} , 即

$$\max F_n^{\text{day}} = \sum_{t=1}^{24} (F_t^{\text{r,c}} + F_t^{\text{r,p}} + F_t^{\text{e}} - C_t^{\text{op}}) - C_n^{\text{m}} \quad (17)$$

式中: $F_t^{\text{r,c}}$ 和 $F_t^{\text{r,p}}$ 分别为 EES 在 t 时段参与调频市场所获得的容量收益和里程收益; F_t^{e} 为 EES 在 t 时段参与能量市场所获得的收益; C_t^{op} 为在 t 时段内的 EES 运行成本; C_n^{m} 为 EES 运行在第 n 年的维护成本。

$$\begin{cases} F_t^{\text{e}} = I_t^{\text{e}} \cdot P_t^{\text{e}} \\ F_t^{\text{r,c}} = I_t^{\text{r,c}} \cdot P_t^{\text{r}} \cdot S^{\text{p}} \\ F_t^{\text{r,p}} = I_t^{\text{r,p}} \cdot \sum_{k=1}^{K_t} |P_{t(k)}^{\text{EES}}| \cdot (\eta_0 - \eta_n) \cdot S^{\text{p}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: I_t^{e} 为 t 时段单位能量价格; P_t^{e} 和 P_t^{r} 分别为 t 时段 EES 在能量市场和调频市场的日前申报容量; $I_t^{\text{r,c}}$ 与 $I_t^{\text{r,p}}$ 分别为 EES 在 t 时段参与调频的容量与性能补偿价格; S^{p} 为 EES 的调频性能指标, 其反映了储能参与调频的精度。该性能指标计算模型参考《华北区域并网发电厂辅助服务管理实施细则》和《华北区域发电厂并网运行管理实施细则》(简称两个细则)^[30], 由于该细则是用于评估传统发电机组的调频性能, 因而在此性能指标基础上乘以效率因子进而得出储能的调频性能指标。其中, 效率因子可由某时段内传统机组调频性能指标的加权平均值进行折算得出^[31]。 $P_{t(k)}^{\text{EES}}$ 具体表达如式(19)所示。

$$P_{t(k)}^{\text{EES}} = \alpha_{t(k)} \cdot P_t^{\text{r}} \quad (19)$$

式中, $\alpha_{t(k)} \in [0, 1]$ 。

式(19)在 EES 第二阶段优化模型中为非线性项, 本文采用二进制扩充的方法并配合大 M 法对该式进行线性化处理^[32]。首先引入二进制变量 $\{b_l^{\text{r},l}, l = 0, 1, \dots, L_t - 1\}$, 对 EES 在 t 时段的申报容量 P_t^{r} 进行替换, 如式(20)所示。

$$\begin{cases} P_t^{\text{r}} = P_t^{\text{r},\min} + \Delta s \sum_{l=0}^{L_t-1} (2^l \cdot b_l^{\text{r},l}) \\ L_t = \text{ceil}\{\log_2[(P_t^{\text{r},\max} - P_t^{\text{r},\min})/\Delta s + 1]\} \end{cases} \quad (20)$$

式中: Δs 为二进制扩充模型分段步长; L_t 为模型所选取的分段步数; ceil 为向上取整函数; $P_t^{\text{r},\max}$ 、 $P_t^{\text{r},\min}$ 分别为 EES 在 t 时段申报容量的最大、最小值。

进一步引入变量 $x_t^{\text{r},l}$, 则 $P_{t(k)}^{\text{EES}}$ 可表示为

$$\begin{cases} P_{t(k)}^{\text{EES}} = P_t^{\text{r},\min} \cdot \alpha_{t(k)} + \Delta s \sum_{l=0}^{L_t-1} (2^l \cdot x_t^{\text{r},l}) \\ x_t^{\text{r},l} = b_l^{\text{r},l} \cdot \alpha_{t(k)} \end{cases} \quad (21)$$

对式(21)中 $x_t^{\text{r},l}$ 运用大 M 法进行线性化处理, 加入约束如式(22)所示。

$$\begin{cases} 0 \leq x_t^{\text{r},l} \leq \alpha_{t(k)} \\ 0 \leq x_t^{\text{r},l} \leq M \cdot b_l^{\text{r},l} \\ x_t^{\text{r},l} \geq P_t^{\text{r}} - M \cdot (1 - b_l^{\text{r},l}) \end{cases} \quad (22)$$

式中, M 为一个正的大数。

EES 第 n 年内每日运行成本可分为运行成本 C_t^{op} 以及维护成本 C_n^{m} 两部分, 如式(23)和式(24)所示。

$$C_t^{\text{op}} = c^{\text{op}} \cdot (2\beta_t \cdot P_t^{\text{r}}) \quad (23)$$

$$C_n^{\text{m}} = c^{\text{m}} \cdot P_n^{\text{EES}} \quad (24)$$

式中: β_t 为 EES 在 t 时段的单位日历寿命损耗系数; c^{op} 和 c^{m} 分别为 EES 运行和维护成本系数。

2.2.2 约束条件

1) 功率运行约束

EES 同时参与电能量和调频辅助服务市场的申报容量之和不得超过 EES 所配置的容量范围, 如式(25)所示。

$$\begin{cases} -P_n^{\text{EES}} \leq P_t^{\text{r}} \leq P_n^{\text{EES}} \\ -P_n^{\text{EES}} \leq P_t^{\text{e}} \leq P_n^{\text{EES}} \\ -P_n^{\text{EES}} \leq P_t^{\text{r}} + P_t^{\text{e}} \leq P_n^{\text{EES}} \end{cases} \quad (25)$$

2) 调频功率约束

EES 跟踪 AGC 调频过程中的实时出力不得超过指令值以免发生超调行为, 如式(26)所示。

$$-P_{i(k)}^{\text{AGC}} \leq P_{i(k)}^{\text{EES}} \leq P_{i(k)}^{\text{AGC}} \quad (26)$$

式中, $P_{i(k)}^{\text{AGC}}$ 为电网下发的第 k 次调频指令值。

3) 能量状态连续性约束

在一个调度周期中, 采用 EES 的能量状态(state of energy, SOE)而不是荷电状态 SOC 作为分析 EES 运行状态的指标, 有助于明确 EES 在给定功率输出下可运作的时间。由于在 EES 放电过程中, SOE 与 SOC 的变化基本呈线性关系^[31], 本文在此选用 SOE 作为衡量 EES 运行状态的指标。

EES 的能量状态在运行过程中须保持连续, 如式(27)所示。

$$\begin{cases} S_t^{\text{SOE}} = S_{t-1}^{\text{SOE}} + \Delta S_t^{\text{SOE}} \\ \Delta S_t^{\text{SOE}} = \frac{\mu_t \cdot \left(P_t^{\text{e,b}} \cdot \eta_n - P_t^{\text{e,s}} / \eta_n + \sum_{k=1}^{K_t} P_{t(k)}^{\text{EES}} \right)}{E_n^{\text{EES}}} \end{cases} \quad (27)$$

式中: $P_t^{\text{e,b}}$ 与 $P_t^{\text{e,s}}$ 分别为 EES 在运行时段 t 内的购售电量; S_t^{SOE} 为 EES 在运行时段 t 结束时所处的能量状态; ΔS_t^{SOE} 为 EES 在运行时段 t 内的能量状态变化值。

4) 能量状态首末约束

当一个调度周期结束时, 须将 EES 的末期能量状态 $S_{\text{end}}^{\text{SOE}}$ 恢复到初始值 S_0^{SOE} , 如式(28)所示。

$$S_{\text{end}}^{\text{SOE}} = S_0^{\text{SOE}} \quad (28)$$

5) 能量状态安全约束

在各运行时段内, EES 的能量状态须保持在一定的安全范围内, 如式(29)所示。

$$5\% \leq S_t^{\text{SOE}} \leq 95\% \quad (29)$$

2.3 模型求解流程

将上述两阶段模型的求解问题视为多参数规划问题, 其中, 第一阶段模型优化的变量为 E_0^{EES} 、 P_0^{EES}

与 T , 第二阶段模型优化的变量为 P_t^{e} 、 P_t^{r} 与 $P_{t(k)}^{\text{EES}}$ 。

首先将 E_0^{EES} 和 T 离散化, 以 ΔE_0^{EES} 及 ΔT 为 EES 的容量配置最小步长, 设 $\{E_{\text{min}}^{\text{EES}} + \Delta E_0^{\text{EES}}, E_{\text{min}}^{\text{EES}} + 2\Delta E_0^{\text{EES}}, \dots, E_{\text{min}}^{\text{EES}} + X\Delta E_0^{\text{EES}}\}$ 为 EES 容量备选集, 并设 $\{T_{\text{min}} + \Delta T, T_{\text{min}} + 2\Delta T, \dots, T_{\text{min}} + Y\Delta T\}$ 为 EES 期望寿命备选集, 形成 $X \cdot Y$ 个备选方案, 进而通过 1.2 节的衰减模型计算 E_n^{EES} 、 P_n^{EES} 以及 η_n , 并作用于第二阶段的优化模型。第二阶段优化模型经线性处理后, 为 0-1 混合整数线性规划模型, 可通过调用 CPLEX 求解器进行求解, 并获得第 n 年 EES 运营收益, 其值作为计算第一阶段决策问题目标值的基础。

以迭代法对上述模型进行求解, 得到 F 最优值对应方案下的 EES 配置结果。模型整体求解流程如图 3 所示。

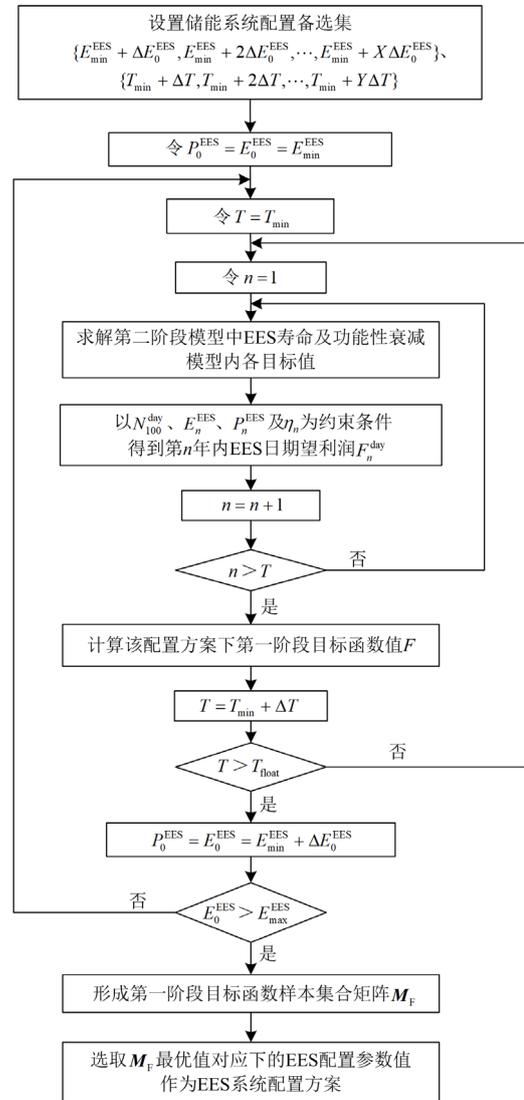


图 3 所提模型的求解流程

Fig. 3 Solution flow of the proposed model

3 算例分析

本文选取 EES 类型为磷酸铁锂电池进行算例研究,在优化过程中,假定电池所配置的功率容量与能量容量在数值上相等。锂电池的相关参数如表 1 所示。设日前时段数为 24,本节采用的日前调频与能量市场价格均来自美国 PJM 市场价格数据,如图 4 所示。在日内实时阶段,选取一机组容量为 600 MW 的机组跟踪 AGC 指令的数据,调度中心在 24 h 内共向调频机组下发了 4368 个 AGC 指令。将 EES 参与机组联合调频,并在联合响应 AGC 指令时给予 EES 一定的灵活性。

表 1 锂电池基本参数

Table 1 Basic parameters of lithium batteries

锂电池基本参数	取值
贴现率 $r/\%$	6
电池浮充寿命 $T_{float}/$ 年	10
EES 调频性能指标 S^p	0.9
电池 100%放电深度下可循环总次数 N_{100}^{fail}	6000
电池 SOE 上限值	0.95
电池 SOE 下限值	0.05
电池初始能量转化效率 η_0	0.93
电池单位功率投资成本 $C^P/$ (美元/kW)	2300
电池单位容量投资成本 $C^E/$ (美元/kWh)	300
储能电站建设成本 $C^F/$ 美元	250 000
电池运行成本损耗系数 $c^{op}/$ 美元	0.5
电池维护成本损耗系数 $c^m/$ 美元	15.4
电池配置功率上限 $P_{max}^{EES}/$ MW	100
电池配置容量上限 $E_{max}^{EES}/$ MWh	100

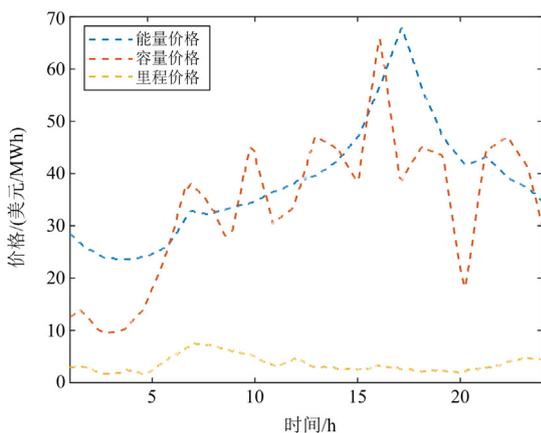


图 4 日前调频与能量市场价格

Fig. 4 Day-ahead frequency and energy market prices

3.1 EES 容量配置结果分析

首先,以 EES 期望寿命周期内的收益净现值最

大化为 EES 容量配置的优化目标,得到 EES 收益净现值与期望寿命和 EES 配置容量的关系如图 5 所示。从图 5 可以看出,在容量配置从 20 MWh 增加到 100 MWh 的过程中,EES 的期望寿命周期内收益净现值始终呈增长趋势,即配置越大的 EES 设备获取的收益净现值也越大。这是因为:由于 EES 作为价格接受者且未考虑与该区域其他设备之间的博弈行为,EES 参与调频辅助市场可获取的利润始终大于 EES 当前容量下的期望寿命周期内总成本。

在期望寿命角度,给定 EES 不同的期望寿命,EES 整体的经济效益存在一定的差别,这是由于受电池功能性老化行为的影响,EES 的能量容量、功率容量以及能量转换效率均会随着 EES 循环寿命的降低而逐年衰减,其每年的衰减程度直接由 EES 的日运营策略所决定,而期望寿命是影响 EES 日运营策略的关键因素。

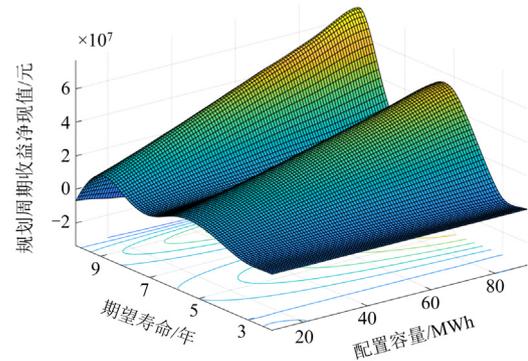


图 5 不同期望寿命和配置容量下的储能收益净现值

Fig. 5 Net present value of energy storage with different life expectancy and configured capacity

从图 5 可以看出,在 EES 配置容量值相对较低时,EES 在 6 年与 8 年期期望寿命下的收益净现值均较佳。随着 EES 配置容量逐渐增加,处于 8 年期期望寿命下的 EES 收益净现值具有较高的增长趋势。

基于上述分析,引入资本回报率指标作为考量 EES 在不同期望寿命和容量配置因素方面的经济性,如图 6 所示。从图 6 可以看出,在 EES 期望寿命方面,分别采用资本回报率与期望寿命周期收益净现值得出的结论接近一致。而在容量配置因素方面,EES 的资本回报率在容量配置增长的前期呈现较快的增长趋势,在达到顶峰后资本回报率会出现一定的跌落,之后逐渐趋于稳定。故在本节,暂时选取资本回报率作为 EES 的容量配置指标。

本算例中 EES 资本回报率最高值所对应的容量配置和期望寿命分别为 62 MWh 和 8 年,资本回报率为 141.3%。此时所配置的 EES 系统具有相对较好的经济性。

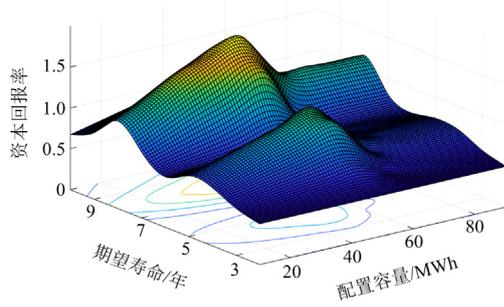


图 6 不同期望寿命和配置容量下的储能资本回报率
Fig. 6 Return on energy storage capital for different life expectancy and configured capacity

3.2 EES 寿命周期运行状态分析

固定 EES 配置容量为 62 MWh, 功率为 62 MW, 基于该配置容量的 EES 电站在不同期望寿命下各年的经济收益情况如图 7 所示。

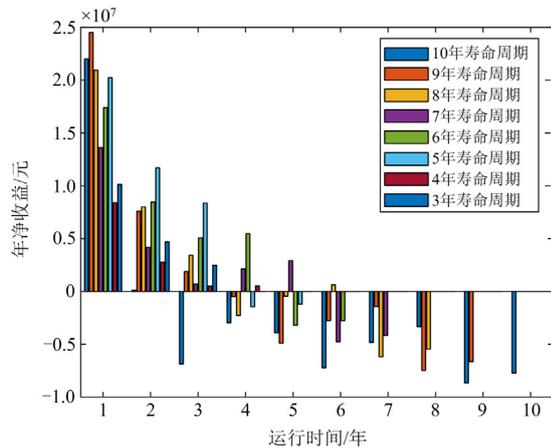


图 7 62 MWh 容量配置下 EES 各运行年净收益值
Fig. 7 Energy storage 62 MWh capacity configuration under each operating year net income value

从图 7 可以看出, 受锂电池功能性老化因素的影响, 在不同的期望寿命周期内, EES 各运行年所采取的策略不同。在期望寿命周期为 8 年的情景下, EES 每年参与电量和调频市场的净收益如图 8 所示。

由图 8 可知, 在 EES 的运行末期, 虽然自身的物理寿命尚未终止, 但其经济寿命^[17]已经提前达到终点。当 EES 运行到期望寿命的末年时, EES 的净收益值均为负值, 且由于自身各功能状态老化情况较为明显, 其日运营策略相较于第一年有着显著差异, 如图 9 所示。

3.3 算例对比分析

为验证本文所建立的 EES 寿命与功能性衰减模型对其期望寿命周期内经济性的影响, 设置以下

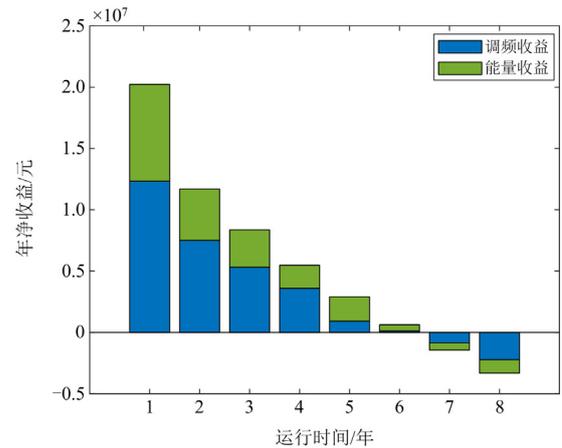


图 8 期望寿命为 8 年时 62 MWh 储能各年净收益值
Fig. 8 Annual net income value of 62 MWh energy storage under an eight-year expected life

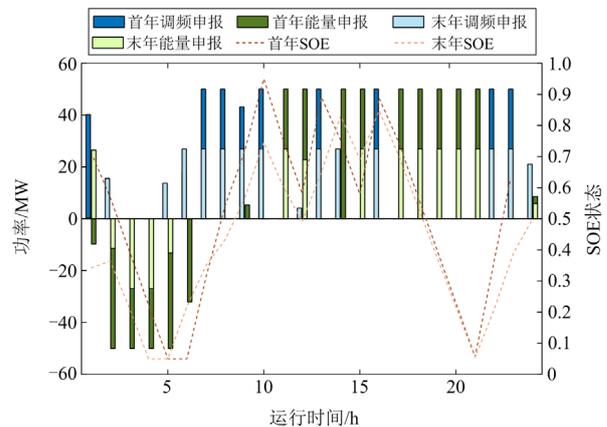


图 9 期望寿命为 8 年时 62 MWh 储能首末年运营策略
Fig. 9 Operating strategy for the first and last years of 62 MWh energy storage under an eight-year expected life

3 种情景进行对比: 情景 1, 考虑 EES 寿命与功能性老化行为; 情景 2, 仅考虑 EES 寿命老化行为; 情景 3, 考虑 EES 寿命与功能性老化行为的同时只参与调频市场。上述 3 种情景中, 情景 3 采用与情景 1 相同的容量配置和期望寿命参数。求解得出的各情景下 EES 期望寿命周期资本回报率情况如表 2 所示。

表 2 EES 优化配置与运营结果

Table 2 Optimized configuration and operation results of EES

情景	功率/ MW	容量/ MWh	资本 回报率/%	期望寿命周期 收益净现值/万元	经济 寿命/年
1	62	62	141.3	4498.23	6
2	84	84	192.8	8611.94	10
3	62	62	107.1	1317.29	4

对比表 2 中情景 1 与情景 2 的结果可知, 不考虑 EES 功能性老化行为的优化结果大大高估了 EES 在期望寿命周期内的盈利能力, 这是由于 EES 在其期望寿命周期内的不同运行年所拥有的实际功率、容量及能量转换效率值相较于出厂时的额定值均有不同程度的下降, EES 在不同的运行年内选择的运营策略不同, 这也导致了 EES 的年收益随着自身功能性的衰减而逐年降低, 因此在未考虑 EES 功能性老化行为的情况下, EES 全寿命周期收益净现值以及资本回报率均相对较高。情景 3 相比于情景 1, 由于失去了参与电能市场获取收益的机会, EES 期望寿命周期的盈利能力有所减弱, 因此应尽可能给予储能系统更多的盈利方式以提升储能系统的盈利能力。

3.4 关键影响因素分析

随着 EES 技术水平的不断发展以及相关产业体系的不断成熟, 对电池健康状态造成负影响的各项指标会呈现下降趋势, 决定电池寿命的循环次数将呈现上升趋势。基于上述储能规划的优化结果, 分析当电池的老化参数 k_p 及可循环次数随着电池未来技术发展进行变化时, 两者各自对 EES 收益净现值的影响。给出电池在不同老化参数 k_p 及循化寿命下电池的收益净现值变化情况, 如图 10 所示。

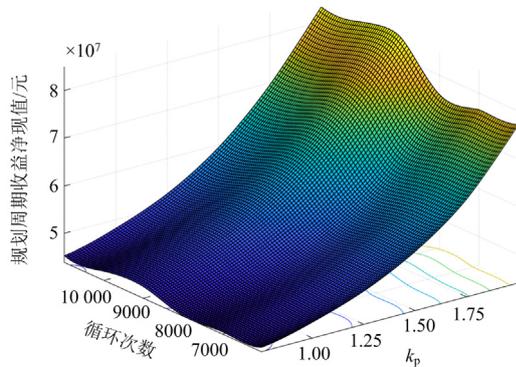


图 10 不同老化参数与循环寿命下储能收益净现值变化
Fig. 10 Changes in energy storage net present value under different aging parameters and cycle life

从图 10 可以看到, 随着 EES 期望寿命周期内可循环次数的增加以及老化参数 k_p 值的升高, EES 的收益净现值呈上升趋势, 且老化参数 k_p 值相对于循环次数对 ESS 的收益净现值影响更大。

4 结论

本文针对独立运营模式下的 EES 容量配置问题, 以锂电池为例, 建立了同时考虑寿命和功能性

老化的衰减模型, 提出一种 EES 容量优化配置的两阶段决策方法, 通过算例仿真验证了所提方法的有效性, 得到以下结论。

1) 提出适用于锂电池的全循环等效寿命与功能性衰减模型, 在假定年内充放电效率、功率容量及能量容量不变的基础上, 将该模型嵌入储能两阶段配置决策模型, 有利于更合理地对 EES 期望寿命周期内的运行状态进行模拟, 能够得到更为准确的 EES 收益净现值变化情况。

2) 所提 EES 容量优化配置的二阶段决策方法, 将寿命周期和容量一并作为决策量, 并可在第二阶段模型中考虑运营场景, 其决策方案可有效反映寿命和功能性损耗对 EES 运营策略的影响。

本文研究着重于完善锂电池期望寿命周期内的多重老化模型, 没有详细考虑独立储能的商业模式对储能容量配置经济性的影响。后期将从独立储能多种商业模式入手, 深入分析独立储能商业模式对其老化行为的影响。

参考文献

- [1] 陈崇德, 郭强, 宋子秋, 等. 计及碳收益的风电场混合储能容量优化配置[J]. 中国电力, 2022, 55(12): 22-33. CHEN Chongde, GUO Qiang, SONG Ziqu, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage capacity for wind farms considering carbon trading revenue[J]. Electric Power, 2022, 55(12): 22-33.
- [2] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179. WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179.
- [3] 李泽航, 周浩, 李浩秒, 等. 面向电力系统的液态金属电池储能技术[J]. 发电技术, 2022, 43(5): 760-774. LI Zehang, ZHOU Hao, LI Haomiao, et al. Liquid metal battery energy storage technology for power system[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(5): 760-774.
- [4] 宋少群, 熊嘉丽, 张伟骏, 等. 电化学储能参与调频市场的贡献评估方法[J]. 中国电力, 2023, 56(1): 87-95. SONG Shaoqun, XIONG Jiali, ZHANG Weijun, et al. A method to evaluate the contribution of electrochemical energy storage participating in frequency regulation market[J]. Electric Power, 2023, 56(1): 87-95.
- [5] 韩晓娟, 牟志国, 魏梓轩. 基于云模型的电化学储能工况适应性综合评估[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 213-219.

- HAN Xiaojuan, MU Zhiguo, WEI Zixuan. Comprehensive evaluation for the adaptability of electrochemical energy storage conditions based on cloud model[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(4): 213-219.
- [6] LI Junhui, MU Gang, ZHANG Jiahui, et al. Dynamic economic evaluation of hundred megawatt-scale electrochemical energy storage for auxiliary peak shaving[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(3): 851-868.
- [7] 李建林, 郭兆东, 曾伟, 等. 面向调频的锂电池储能建模及仿真分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(13): 33-42.
- LI Jianlin, GUO Zhaodong, ZENG Wei, et al. Modeling and simulation analysis of lithium battery energy storage oriented to frequency modulation[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(13): 33-42.
- [8] 汤杰, 李欣然, 黄际元, 等. 以净效益最大为目标的储能电池参与二次调频的容量配置方法[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(5): 963-972.
- TANG Jie, LI Xinran, HUANG Jiyuan, et al. Capacity allocation of BESS in secondary frequency regulation with the goal of maximum net benefit[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(5): 963-972.
- [9] ABDELTAWAB H, MOHAMED Y A R I. Energy storage planning for profitability maximization by power trading and ancillary services participation[J]. *IEEE Systems Journal*, 2022, 16(2): 1909-1920.
- [10] 杨晓辉, 袁志鑫, 肖锦扬, 等. 考虑电池寿命的混合储能微电网优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(4): 22-31.
- YANG Xiaohui, YUAN Zhixin, XIAO Jinyang, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage microgrid considering battery life[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(4): 22-31.
- [11] LU Languang, HAN Xuebing, LI Jianqiu, et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 226: 272-288.
- [12] MA X, ZHANG H, SUN C, et al. An optimal strategy of electrolyte flow rate for vanadium redox flow battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 203: 153-158.
- [13] 齐步洋, 卓振宇, 杜尔顺, 等. 考虑储能装置寿命的电网侧规模化电化学储能规划与评估方法[J]. *中国电力*, 2023, 56(8): 1-9, 47.
- QI Buyang, ZHUO Zhenyu, DU Ershun, et al. Planning and assessment method of large-scale electrochemical energy storage in power grids considering battery aging[J]. *Electric Power*, 2023, 56(8): 1-9, 47.
- [14] 孙丙香, 任鹏博, 陈育哲, 等. 锂离子电池在不同区间下的衰退影响因素分析及任意区间的老化趋势预测[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(3): 666-674.
- SUN Bingxiang, REN Pengbo, CHEN Yuzhe, et al. Analysis of influencing factors of degradation under different interval stress and prediction of aging trend in any interval for lithium-ion battery[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(3): 666-674.
- [15] 李中浩, 余娟, 杨知方, 等. 精准计及大规模储能电池寿命的电力系统经济调度[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 43(19): 7371-7383.
- LI Zhonghao, YU Juan, YANG Zhifang, et al. Economic dispatch of power system accurately considering the life of large-scale energy storage battery[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 43(19): 7371-7383.
- [16] HE G, CHEN Q, KANG C, et al. Optimal bidding strategy of battery storage in power markets considering performance-based regulation and battery cycle life[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(5): 2359-2367.
- [17] HE G, CIEZ R, MOUTIS P. The economic end of life of electrochemical energy storage[J]. *Applied Energy*, 2020, 273.
- [18] 贺鸿杰, 张宁, 杜尔顺, 等. 电网侧大规模电化学储能运行效率及寿命衰减建模方法综述[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(12): 193-207.
- HE Hongjie, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review on modeling method for operation efficiency and lifespan decay of large-scale electrochemical energy storage on power grid side[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(12): 193-207.
- [19] 葛玉友. 寿命约束的储能规划[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(19): 6150-6161.
- GE Yuyou. Energy storage planning constrained by its life[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(19): 6150-6161.
- [20] 王泽爽, 陈嘉俊, 朱建全, 等. 计及循环寿命的储能优化配置与运营策略[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(10): 75-81.
- WANG Zeshuang, CHEN Jiajun, ZHU Jianquan, et al. Optimal configuration and operation strategy of energy storage considering cycle life[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(10): 75-81.
- [21] 姜欣, 郑雪媛, 胡国宝, 等. 市场机制下面向电网的储能系统优化配置[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(21): 4601-4610.
- JIANG Xin, ZHENG Xueyuan, HU Guobao, et al. Optimization of battery energy storage system locating and sizing for the grid under the market mechanism[J]. *Transaction of China Electrotechnical Society*, 2019,

34(21): 4601-4610.

[22] 刘凡, 李凤婷, 张高航, 等. 计及循环寿命和运营策略的风电汇集区域储能电站优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 127-139.
LIU Fan, LI Fengting, ZHANG Gaohang, et al. Optimal configuration of storage power stations in a wind power gathering area considering cycle life and operation strategy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 127-139.

[23] ZHANG Yongxi, XU Yan, YANG Hongming, et al. Optimal whole-life-cycle planning of battery energy storage for multi-functional services in power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2077-2086.

[24] DUBARRY M, QIN N, BROOKER P. Calendar aging of commercial li-ion cells of different chemistries: a review[J]. Current Opinion in Electrochemistry, 2018, 9: 106-113.

[25] HE G, CHEN Q, MOUTIS P, et al. An intertemporal decision framework for electrochemical energy storage management[J]. Nature Energy, 2018, 3(5): 404-412.

[26] HAN Xuebing, LU Languang, ZHENG Yuejiu, et al. A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle[J]. e-Transportation, 2019, 1: 100005.

[27] JI Hao, ZHANG Wei, PAN Xuhai, et al. State of health prediction model based on internal resistance[J]. Energy Research, 2020, 44(8): 6502-6510.

[28] 陈媛. 锂离子电池状态估计及寿命模型研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
CHEN Yuan. Research on state estimation and life model of lithium ion battery[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.

[29] 赵伟, 袁锡莲, 周宣行, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 16-24.
ZHAO Wei, YUAN Xilian, ZHOU Yixing, et al. Capacity configuration method of a second-use battery energy storage system considering economic optimization within service life[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 16-24.

[30] 国家能源局华北监管局. 华北能源监管局关于印发华北区域并网发电厂“两个细则”(2019年修订版)的通知[R]. 北京: 国家能源局华北监管局, 2019.
North China Energy Regulatory Bureau of National Energy Administration of the People's Republic of China. Notice of the North China energy regulatory bureau on the issuance of "two detailed rules" (2019 revision) for grid-connected power plants in North China[R]. Beijing: North China Energy Regulatory Bureau of National Energy Administration of the People's Republic of China, 2019.

[31] 孙丙香, 李旸熙, 龚敏明, 等. 参与 AGC 辅助服务的锂离子电池储能系统经济性研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(19): 4048-4061.
SUN Bingxiang, LI Yangxi, GONG Minming, et al. Study on the economy of energy storage system with lithium-ion battery participating in AGC auxiliary service[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(19): 4048-4061.

[32] BAKIRTZIS A G, ZIOGOS N P, TELLIDOU A C, et al. Electricity producer offering strategies in day-ahead energy market with step-wise offers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1804-1818.

收稿日期: 2024-02-22; 修回日期: 2024-06-26

作者简介:

于娜(1977—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力市场需求侧; E-mail: yuna0616@163.com

吴钰豪(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为储能规划; E-mail: wyh730816@163.com

黄大为(1976—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行与控制、综合能源系统运行与规划。E-mail: hdw76@163.com

(编辑 张颖)