

面向经济评估的电池储能系统工况特征量嵌入性研究

马会萌, 李蓓, 李建林, 惠东

(中国电力科学研究院新能源与储能运行控制国家重点实验室, 北京 100192)

摘要: 储能系统的投资过程主要包括初始购置、运维和置换三个阶段, 不同的应用工况将对电池储能系统的寿命衰减速率产生差异化影响, 进而影响其成本投入过程, 也是储能系统经济评估中的必要考虑因素。面向储能系统的经济性动态评估, 首先定义温度、倍率、放电深度(Depth of Discharge, DOD)、充放电频次等作为储能工况特征量。基于工况特征量与电池寿命损耗之间的关联关系, 建立了计及工况特征参量的储能系统出力模型和成本模型。基于全寿命周期成本模型(Life Cycle Cost, LCC)和遗传算法, 分析了工况特征量在储能成本评估中考虑的必要性及其影响程度。最后, 在平抑光伏波动和负荷侧削峰填谷两种工况下展开算例分析, 验证了在储能规划过程中考虑工况特征量的必要性。该研究将为储能规划阶段的经济性评估提供理论依据与数据基础。

关键词: 电池储能系统; 工况特征量; 全寿命周期; 经济性评估

Embedded research on working condition characteristics of battery energy storage system for economic evaluation

MA Huimeng, LI Bei, LI Jianlin, HUI Dong

(State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems,
China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The investment progress of BESS includes 3 parts, initial purchase, operation and replacement. The working conditions will have different effects on the life decay rate of BESS, and then affect the investment process of BESS. So it's necessary to consider the characteristics of the operating conditions in dynamic economic evaluation of BESS. Firstly this paper defines temperature, rate, Depth of Discharge (DOD), the frequency of charge/discharge as condition characteristic parameter of BESS in BESS-oriented economy dynamic assessment. Based on the relationship between condition characteristic parameter and battery life loss, it builds the output model and the cost model of BESS considering the characteristic parameters of the operating condition. Then, based on the Life Cycle Cost (LCC) model and genetic algorithm, it analyzes the necessity and influence of operating conditions on the economic evaluation of BESS. Finally, it carries out example analysis under two operating conditions, i.e. stabilizing the output fluctuation of PV power station and load peak shaving. The necessity of considering the operating condition characteristics in the process of BESS planning is verified. The research will provide theoretical basis and data base for economic evaluation of BESS in the stage of planning.

Key words: BESS; condition characteristic parameter; life cycle; economic evaluation

0 引言

电池储能技术为提高新能源消纳能力提供了重要支撑。而目前较高的投资成本成为储能应用技术相关研究中不可回避的问题, 储能应用领域的相关

研究对于储能经济性也多有涉及^[1-4]。

文献[5]建立了考虑电池充放电深度及寿命的储能电站初始投资、运行维护成本计算模型, 建立了包括发电侧、电网侧及政府补贴等储能收益计算模型。文献[6]以配电网中蓄电池储能系统全寿命周期内总的净收益最大为目标, 研究配电网中蓄电池的配置和各时段充/放电值的优化, 综合考虑了储能全寿命周期成本、套利收入、政府电价补贴收入等

因素。文献[7]将投资成本、惩罚、污染费用以及发电补贴总和最小作为目标函数。文献[8]以装置成本最低为目标, 并考虑了混合储能装置的功率出力 and 荷电状态约束, 但并未计及整个寿命周期内更换、维护设备所产生的费用。文献[9]分析了用户侧加装储能系统的经济性, 成本主要包括投资成本和运行成本, 建立相应的经济模型, 电池更换周期默认为电力设备的一半, 即 15 年。文献[10]从储能系统的静态效益、动态效益和社会效益出发, 对储能系统的经济性进行评价。文献[11]建立了包括初始投资和运营维护的成本模型, 仿真分析了在不同调峰程度下储能系统的容量需求, 置换周期为对应充放电深度下储能系统的循环寿命与年充放电循环次数的比值。文献[12]以满足夜间全部溢出风能和风电最大溢出功率为目标, 对各种蓄电池储能系统的年运行成本进行比较, 包括总投资成本、运行成本、置换成本, 其中储能置换周期为循环次数与蓄电池年度充放电次数的比值。文献[13]从初始成本、更换成本、维护成本三方面进行成本计算, 更换成本由更换次数、功率单价和容量单价计算得出, 更换周期由充放电次数和放电深度决定。

从上述研究情况可以看出, 目前已有在全寿命周期时间尺度考虑储能系统投资成本的研究, 但是在计算过程中, 对储能系统置换周期的考虑仅停留在考虑充放电深度及次数层面的粗略估算, 并不能完全体现特定工况下储能系统的寿命损耗速率及不同工况条件下储能系统的成本构成分布情况, 全面考虑工况因素的动态经济评估未见公开报道。不结合工况条件开展储能经济性评估将会出现整个规划期内投资成本预估不准, 后期追加投资安排不周的情况。温度、充放电倍率和充放电深度等工况特征参量会对锂电池储能的寿命衰减速率产生影响, 且该影响将随充放电时间/充放电次数的累积而变化, 实际工况情况对储能全寿命周期经济评估的影响不可忽略, 需将工况特征量与经济性评估参量建立映射关系, 并进行工况嵌入式经济分析才能较为客观地评估储能系统的整体投资情况。本文在锂电池储能系统寿命损耗敏感性因素分析基础上, 开展工况特征对电池储能系统寿命损耗的影响, 进而开展工况特征对储能系统投资过程的影响分析; 依托平抑光伏出力波动和削峰填谷两种典型工况, 分析工况差异对储能成本分布差异的影响, 为后续储能优化规划奠定理论基础。首先搭建嵌入工况特征参量的储能系统出力模型和成本模型, 在分析工况特征对储能系统寿命损耗速率影响的基础上, 开展典型工况条件对储能系统经济性差异性影响的算例分析。

1 储能系统出力模型

在考虑电池储能系统的能量转换效率、倍率能力、SOC 运行范围等因素情况下, 构建电池储能系统的出力模型^[14]。

基于各时刻储能系统的出力需求 P_{bess}^k ($k=1, 2, \dots, n$), 定义 $P_{\text{bess}}^k < 0$ 时储能系统充电, $P_{\text{bess}}^k > 0$ 时储能系统放电。得到各时刻储能系统充放电的功率值后, 拟合功率数据的概率分布, 根据储能应用的实际要求, 权衡应用效果和储能成本, 设置合理的置信水平, 置信水平为 $1-\alpha$ 下的置信区间为 $[c_1, c_2]$, 选择置信区间上下限绝对值的最大值定义为电池储能系统的额定功率 $P_{\text{bess}}^{\text{rate}}$ 。为了避免电池储能系统出现满充或过放情况, 以延长其使用寿命, 设置 SOC 合理运行范围为 $[SOC_{\min}, SOC_{\max}]$, SOC_{\max} 和 SOC_{\min} 分别为电池储能系统的允许能量状态上下限, SOC 初始值计为 SOC_0 ($SOC_{\min} \leq SOC_0 \leq SOC_{\max}$)。

$$P_{\text{bess}}^k = \begin{cases} P_{\text{bess}}^k \times \gamma_{\text{ch}}^k, & P_{\text{bess}}^k < 0 \\ P_{\text{bess}}^k / \gamma_{\text{disch}}^k, & P_{\text{bess}}^k > 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\gamma_{\text{ch}}^k = f_{r1}(T_k, \eta_k); \quad \gamma_{\text{disch}}^k = f_{r2}(T_k, \eta_k) \quad (2)$$

$$P_{\text{bess}}^{\text{rate}} \geq \max[|P_{\text{bess}}^1|, |P_{\text{bess}}^2|, \dots, |P_{\text{bess}}^n|] / C_{\text{bess-I}}^+ \quad (3)$$

$$P(-P_{\text{bess}}^{\text{rate}} \cdot \eta \leq P_{\text{bess}}^{\text{rate}} \leq P_{\text{bess}}^{\text{rate}} \cdot \eta) \geq 1 - \alpha \quad (4)$$

式中: P_{bess}^k 为 k 时刻电池储能系统输出的并网功率; P_{bess}^k 为 k 时刻电池储能系统侧的充放功率需求; γ_{ch}^k 为 k 时刻电池储能系统的充电效率; γ_{disch}^k 为 k 时刻电池储能系统的放电效率, 充放电效率为温度 T_k 和充放电倍率 η_k 的函数; $C_{\text{bess-I}}^+$ 为储能系统的充放电倍率上限; $P_{\text{bess}}^{\text{rate}}$ 为电池储能系统的额定功率。

k 时刻储能系统 SOC 值为 SOC_k , 如式(5)所示。

$$SOC_k = SOC_{k-1} + \frac{\int_{(k-1)\Delta T}^{k\Delta T} P_{\text{bess}}^k dt}{E_{\text{rate}}} \quad (5)$$

式中: ΔT 为储能功率指令间隔; E_{rate} 为储能系统的额定容量。

在电池储能系统工作过程中, 各时刻的储能系统能量状态均应处于允许范围内, 如式(6)所示。

$$\begin{cases} \max\{SOC_1, SOC_2, \dots, SOC_k, \dots\} \leq SOC_{\max} \\ \min\{SOC_1, SOC_2, \dots, SOC_k, \dots\} \geq SOC_{\min} \end{cases} \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)解得最优储能容量为

$$E_{\text{rate}} \geq \max \left\{ \frac{\max(\int_0^{k\Delta T} P_{\text{bess}}^k dt) - \min(\int_0^{k\Delta T} P_{\text{bess}}^k dt)}{SOC_{\max} - SOC_0}, \frac{\max(\int_0^{k\Delta T} P_{\text{bess}}^k dt)}{SOC_0 - SOC_{\min}} \right\} \quad (7)$$

2 储能系统成本模型

2.1 工况特征对储能投资成本的影响分析

在规划阶段，储能系统工况既定，即应用场景和应用模式已确定，在应用过程中，储能设备对工况技术性需求的响应情况基本稳定不变，可以理解为静态过程；而经济性，如果单考虑投资成本的话，在全寿命周期尺度内，包括初始购置成本、运维成本和置换成本(图 1)。其中初始购置成本与储能系统的净功率需求、净容量需求、功率成本单价、容量成本单价、放电深度、倍功率能力以及能量转换效率等均有关；对于电化学储能，从退化失效的角度分析，在使用过程中，某性能的退化量随时间逐渐增大，当达到失效阈值时则表征使用寿命结束。通常定义为实际容量退化为标称容量的 80% 时所对应的循环寿命或日历寿命。当电池储能寿命损耗一定比例后，不能满足工况需要，需重新购置储能系统，产生置换成本，而储能系统的寿命损耗受储能应用过程中诸多工况因素影响，因此储能系统的经济性指标除与购置单价、运维单价等经济性因素有关之外，还与工况过程有关，属于“动态过程”。

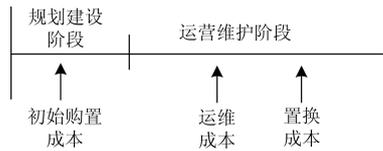


图 1 储能系统全寿命周期阶段划分

Fig. 1 Stage division of the whole life cycle of the ESS

储能系统全寿命周期投资成本为

$$C_{\text{bess}} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (8)$$

$$\begin{cases} C_1 = P_{\text{rate}} \cdot N_m \cdot C_P \\ C_2 = E_{\text{rate}} \cdot C_E \\ C_3 = \int_0^n E_M \cdot C_M \\ C_4 = N_{\text{change}} \cdot E_{\text{rate}} \cdot C_E \\ P_{\text{rate}} \cdot N_m \geq P_{\text{net}} \\ E_{\text{rate}} \geq \frac{E_{\text{net}}}{SOC_{\text{range}}} \\ N_{\text{change}} \propto \frac{1}{N_{\text{life}}} \end{cases} \quad (9)$$

式中： C_{bess} 为规划期内储能系统的总投资成本； C_1 为初始购置功率成本； C_2 为初始购置容量成本； C_3 为运维成本； C_4 为置换成本； P_{rate} 为储能系统用 PCS 的额定功率； C_P 为 PCS 的功率成本单价(对于液流

电池而言， C_P 为储能用 PCS 的功率成本单价和液流电池储能功率成本单价之和)； C_E 为储能设备的容量成本单价； n 为储能规划运行年限； E_M 为储能系统每年的累积吞吐电量； C_M 为运维成本单价； N_{change} 为储能设备的置换次数； N_m 为储能系统的倍功率能力； P_{net} 为储能系统的净功率需求； E_{net} 为储能系统的净容量需求； SOC_{range} 为储能系统的 SOC 运行范围，在平抑工况下为 $\min\{SOC_{\text{max}} - SOC_0, SOC_0 - SOC_{\text{min}}\}$ ，在降低弃光率工况下为 $SOC_{\text{max}} - SOC_{\text{min}}$ ； N_{life} 为储能系统的循环寿命。

应用工况定义为在应用场景及应用模式确定的情况下，储能系统的工作情况。已有研究表明，温度、倍率等描述工况的特征量均会对电池储能系统的可用容量、能量转换效率产生影响，并且温升、倍率、放电深度(Depth of Discharge, DOD)、循环次数或搁置时间等工况特征量均会对储能电池的寿命衰减速率产生影响^[15-16]。

以锂电池为例，技术指标及工况条件对储能经济性的影响如图 2 所示。随着充放电电流倍率增大，电池储能系统可用的充/放电深度降低，即在额定能量确定的情况下，可用能量减少，二者呈反向变化趋势；充电起始 SOC 越高，可充能量越少，充电起

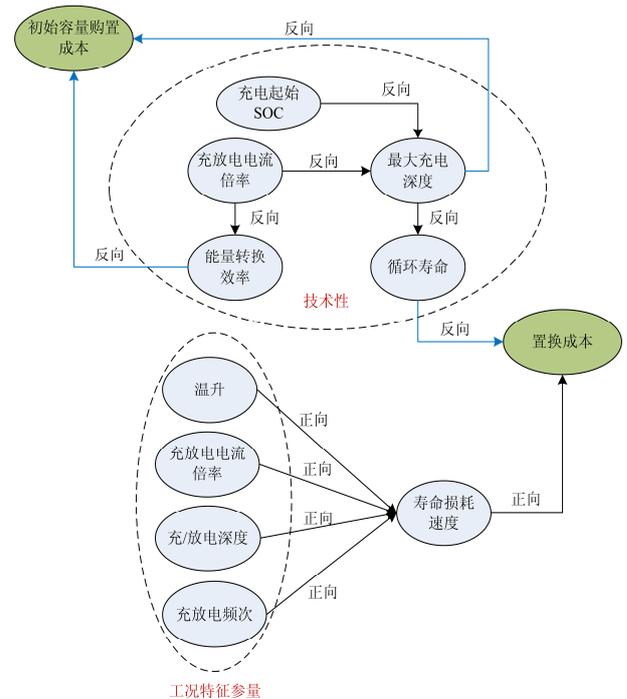


图 2 技术性因素及工况特征参量对经济性影响的示意图
Fig. 2 Sketch of the influence of technical factors and operating conditions on the economy

始 SOC 越低, 可充能量越多, 放电起始 SOC 反之; 随充/放电深度增大, 储能系统的循环寿命降低, 二者呈反向变化趋势; 充放电电流倍率越高, 能量转换效率越低, 二者呈反向变化趋势。在工况既定的情况下, 储能系统的净功率需求、净容量需求确定, 放电倍率越低, 放电深度越低, 能量转换效率越低, 则额定容量需求越大, 初始容量购置成本越大, 但以较低的放电倍率或放电深度运行, 会延缓电池储能的寿命损耗, 减少置换次数, 二者对全寿命周期总投资成本的影响是相反的。

2.2 工况特征引入过程

储能系统应用过程的经济性与工况特征相关, 属于动态过程, 为了提高选型方案的工程适用性, 需要将工况特征引入经济性评估过程。

工况特征的引入过程步骤如下所述。

1) 工况特征评估参量包括温度、充放电电流倍率和放电深度, 以式(10)描述电池储能系统寿命损耗与各工况特征参量间的函数关系。

$$\begin{cases} L_{\text{bess}}^1 = f_1(T_{\text{bess}}, t) \\ L_{\text{bess}}^2 = f_2(C_1, n) \\ L_{\text{bess}}^3 = f_3(DOD, n) \end{cases} \quad (10)$$

式中: L_{bess}^l 为电池储能系统的寿命损耗, $l=1, 2, 3$, 分别代表受温度、充放电倍率、放电深度单一应力作用下的寿命损耗; T_{bess} 为电池温度; t 为时间; C_1 为充放电电流倍率; DOD 为放电深度; n 为充放电次数。

2) 基于典型工况下的单位连续时长 t_{sample} 的数据样本, 提取温度、充放电电流倍率、放电深度的概率密度分布情况。

3) 基于步骤1)中的寿命损耗函数关系式和步骤2)提取的概率密度分布, 折算储能系统在典型工况下运行单位时长产生的寿命损耗, 以电池储能系统充放电电流倍率 C_1 为例, 假定 C_1 服从如图3所示的概率密度分布, 折算步骤如下所述。

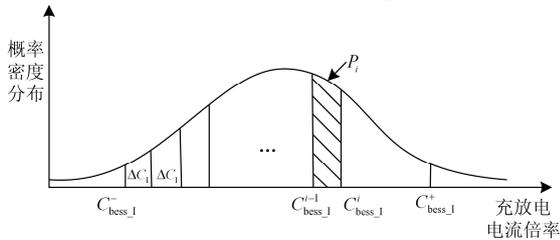


图3 充放电电流倍率的概率密度分布及其区间划分示意图

Fig. 3 Probability density distribution of the charge and discharge current rate and the sketch map of interval

(1) 将 $C_{\text{bess-1}}$ 的概率密度分布在实际可能出现的倍率 $[C_{\text{bess-1}}^-, C_{\text{bess-1}}^+]$ 等间距划分为 n 个区间, 其中 $C_{\text{bess-1}}^-$ 为倍率范围下限, $C_{\text{bess-1}}^+$ 为倍率范围上限, 间距为 ΔC_1 , 记各倍率区间出现的概率为 P_i , 其中 $(i=1, 2, \dots, n)$, 以各倍率区间的平均值代表倍率区间的倍率值, 即第 i 个倍率区间的倍率值取为

$$\overline{C_{\text{bess-1}}^i} = (C_{\text{bess-1}}^{i-1} + C_{\text{bess-1}}^i) / 2 \quad (11)$$

(2) 计算在单位数据样本时间范围内, 各倍率区间出现次数 $n_i = N_{\text{bess}} \cdot P_i$, 基于式(10)计算各倍率范围内储能系统产生的累积寿命损耗 $L_{\text{bess}}^{2i} = f_2(\overline{C_{\text{bess-1}}^i}, n_i)$, 将各倍率区间造成的寿命损耗累加, 即得到在该单位时长内, 由充放电电流倍率特征量造成的寿命损耗。

$$L_{\text{bess}}^2 = \sum_{i=1}^n L_{\text{bess}}^{2i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

类似地可以计算出由温度和放电深度因素造成的寿命损耗 L_{bess}^1 和 L_{bess}^3 。

(3) 计算在单位时长内, 由三种工况特征参量共同作用引起的寿命损耗 $L_{\text{bess}}^{\text{total}}$ 。

$$L_{\text{bess}}^{\text{total}} = f(L_{\text{bess}}^1, L_{\text{bess}}^2, L_{\text{bess}}^3) \quad (13)$$

通过测量得到多组在该工况条件下, 储能系统在单位时长内产生的寿命损耗 $L_{\text{bess}}^{\text{total}}$ 与对应的 L_{bess}^1 、 L_{bess}^2 和 L_{bess}^3 , 采用数据拟合得到式(13)。

(4) 基于步骤(1)至步骤(3)估算出的典型工况下储能系统在单位时长内产生的寿命损耗, 计算电池储能系统在典型工况下的置换次数为

$$N_{\text{change}} = \frac{N_{\text{plant}} \times 8760}{\frac{N_{\text{life}}}{L_{\text{loss}}^{\text{total}}} \times t_{\text{sample}}} \quad (14)$$

式中: N_{plant} 为光伏电站的规划运行年限; N_{life} 为电池储能系统的循环寿命。

从以上分析看出, 储能系统的初始购置成本和置换成本均会随温度、倍率以及放电深度变化, 并且变化趋势不同, 需要通过选择合适的智能优化算法, 以工况特征参量为变量, 求解最优的储能投资成本。

目标函数:

$$\text{Min } C_{\text{bess}} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (15)$$

约束条件:

$$\begin{aligned} \text{s. t. } & T_{\text{min}} \leq T \leq T_{\text{max}} \\ & 0 \leq DOD \leq 100\% \\ & C_{\text{bess-1}}^- \leq C_{\text{bess-1}} \leq C_{\text{bess-1}}^+ \end{aligned} \quad (16)$$

3 算例分析

3.1 工况介绍

选取具有代表性并且差异性较大的两种工况——平抑光伏电站出力波动和负荷曲线削峰填谷开展算例分析。

3.1.1 平抑光伏电站出力波动

随机波动性强是光伏发电最典型的特点，也是储能技术可以支撑的短板。采用储能技术平抑光伏出力波动，可提高光伏对电网的接入友好性。采用经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)算法^[17]实现对光伏出力的低通滤波功能，通过 EMD 对光伏出力的频域分解，得到了不同频段的 IMF 分量和余项如式(17)所示。计 P_{out} 为满足平抑目标时的最小层数 m ，因为不同天气情况下光伏电站出力包含的波动特征不同，所以根据输入的光伏波动情况实时调整 m 值，构造自适应 EMD 低通滤波器，以保证配置满足平抑要求的最优储能容量。取低频区的第 $m+1$ 项到第 n 项 IMF 分量和余项相加得到平抑后的输出如式(18)所示，储能系统出力如式(19)所示。图 4 为平抑工况的储能工作流程图，在平抑

工况下，设置单天为储能系统工作周期，在每个周期后期，光伏电站无出力的夜间采用 SOC 周期性调节控制将储能系统的 SOC 值调回初始状态，以保证第二天的持续工作能力。

$$P_{PV} = \sum_{i=1}^n h_i(t) + r_n(t) \quad (17)$$

$$P_{out} = \sum_{i=m+1}^n h_i(t) + r_n(t) \quad (18)$$

$$P_{bess} = P_{out} - P_{PV} = - \sum_{i=1}^m h_i(t) \quad (19)$$

3.1.2 削峰填谷

目前竞争日趋激烈的电力市场环境下，电网公司需要在提高电能安全、稳定、可靠的同时，尽可能地减少电网运行、升级改造等费用。由于储能系统具有快速充放的特性，可以用来在负荷低谷期充电储存能量，在负荷高峰期放电释放能量，实现负荷削峰填谷，可以减少输配电网容量建设，减少系统阻塞概率，进而可以延缓输配电线路和配电站的投资建设。在削峰填谷的工况下，储能系统的功率需求与实时负荷功率和负荷峰谷限值定义有关，可采用式(20)计算。

$$P_{bess}^k = \begin{cases} P_{LOAD}^k - P_{LOAD_lim}^+, & \text{if } P_{LOAD}^k > P_{LOAD_lim}^+ \\ P_{LOAD}^k - P_{LOAD_lim}^-, & \text{if } P_{LOAD}^k < P_{LOAD_lim}^- \\ 0, & \text{if } P_{LOAD_lim}^- < P_{LOAD}^k < P_{LOAD_lim}^+ \end{cases} \quad (20)$$

基于前期的研究，两种工况的特征对比如表 1 所示，从表中可以看出两种工况的特征差异明显，工况 1 下，储能浅充浅放、充放电状态频繁切换，而工况 2 下，储能深充深放，每天充放一次。后续通过仿真计算来量化对比两种工况差异对储能成本构成的影响。

表 1 两种工况的特征对比

Table 1 Two working conditions characteristics comparison

		工况 1: 平抑光伏电站出力波动	工况 2: 削峰填谷
工况特征	倍率	中低倍率	低倍率
	放电深度	浅充浅放	深充深放
	充放电频次	充放电频繁	每天充放一
	充放电状态持续时长	时间短，数十分钟	时间长，数小时级
	单次吞吐电量	小	大

3.2 优化算法

对 2.1 节搭建的储能成本模型求解，需要采用智能优化算法。目前优化算法有很多种，如单纯型法、遗传算法以及粒子群算法等。传统的优化算法

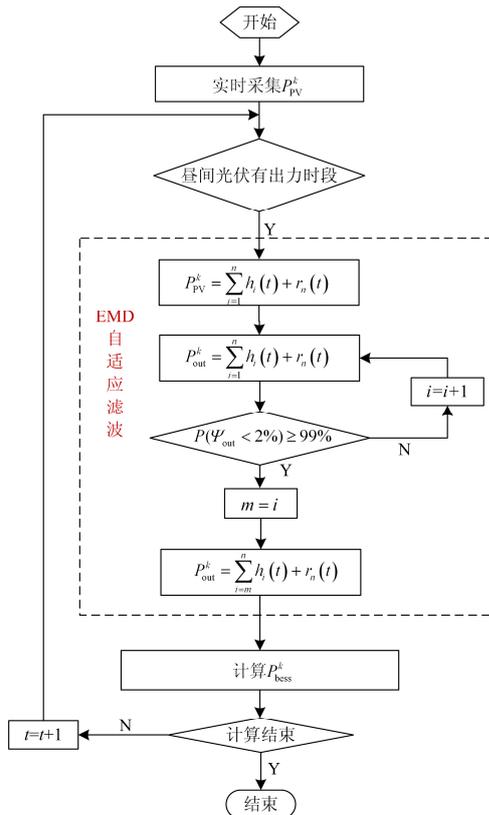


图 4 平抑工况的储能工作流程图

Fig. 4 Work flow chart of energy storage in the stabilizing condition

大多是根据梯度信息寻优, 针对无梯度信息的问题很难得到处理。遗传算法是一种概率型的智能算法, 可以很好地解决这类问题^[18]。计算过程中, 遗传算法参数设置如表 2 所示。

表 2 遗传算法参数设置

Table 2 Parameter setting of genetic algorithm

参数	参数值
迭代次数	400
个体数	40
码长	10
交叉率	0.9
变异率	0.01
重插率	0.95

3.3 仿真分析

以平抑某 20 MWp 光伏电站和配电网负荷削峰填谷为典型工况, 分析工况差异对储能系统经济性的影响, 鉴于目前缺乏系统级电池储能在温度、充放电倍率因素下寿命损耗的研究数据, 仅以充放电深度为例, 研究工况特征对储能全寿命投资成本分布的影响。文献[19]提出的雨流计数法, 适用于实际应用, 特别是不规则充放电应用中电池(如锂电池、铅酸电池)寿命损耗的折算, 已经得到多次引用。

雨流计数法基于电池储能系统的实际运行 SOC 时序数据, 提取过程是首先找到 SOC 时序曲线的极值点, 从 SOC 时序数据中提取出不同放电深度及其出现的频次, 然后结合不同放电深度下储能系统的循环寿命数据^[20], 计算实际工况下产生的等效寿命损耗。

计第 i 次放电深度为 DOD_i , 该次放电产生的等效寿命损耗为

$$LoL(DOD_i) = \frac{N_{cyc}(DOD_i)}{N_{ctf}(DOD_i)} \quad (21)$$

式中: $N_{cyc}(DOD)$ 为放电深度 100% 对应的循环寿命; $N_{ctf}(DOD_i)$ 为放电深度 DOD_i 对应的循环寿命。

在运行周期内的累计寿命损耗如式(22)所示, 再采用式(14)即可估算规划期内储能系统的置换次数。

$$LoL = \sum_{i=1}^{i=N} LoL(DOD_i) = \sum_{i=1}^{i=N} \frac{N_{cyc}(DOD)}{N_{ctf}(DOD_i)} \quad (22)$$

在平抑工况下, 以平抑 20 MWp 光伏电站出力波动率至每分钟 2%, 置信度取 99%。在削峰填谷工况下, 以某配电网为应用背景, 负荷峰值小于 1000 kW, 设定 500 kW 为负荷谷值, 800 kW 为负荷峰值, 图 5 和图 6 为典型某天内储能系统的应用

效果, 对比分析, 在平抑工况下, 储能系统充放电频繁, 且多为浅充浅放, 削峰填谷工况下, 储能系统一天内充放电一、两次, 持续充放电时长为 2~4 h, 充放电深度大。

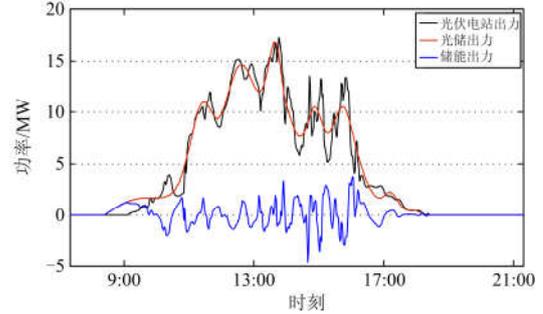


图 5 某天多云天气下的平抑效果

Fig. 5 Effect of stabilizing fluctuations on a cloudy day

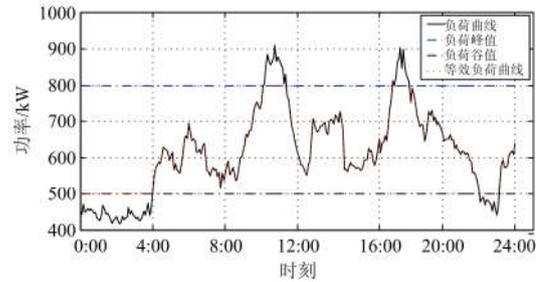


图 6 削峰填谷效果

Fig. 6 Effect of peak-load shifting

在平抑工况下, 取锂电池的能量转换效率为 95%, SOC 仍取 0~100%, 当初始 SOC 取 50% 时, 基于上述边界条件, 采用 EMD 自适应滤波和储能系统出力模型计算得到储容需求约为 7 MW/8.14 MWh。将此需求作为初始值, 以储能系统的 SOC 上下限值 SOC_{max} 和 SOC_{min} 为变量, 变量满足边界条件 $SOC_{min} \leq SOC_0 \leq SOC_{max}$, 以储能系统全寿命周期投资成本最低为目标函数, 采用遗传算法开展全寿命周期储能成本寻优, 每一次迭代过程中, 基于雨流算法折算放电深度、放电频次与寿命损耗间的关系。

计算得到 25 年内, 储能系统需置换 5 次, 优化的 SOC 运行行为为 [0.12, 0.86], 储容实际需求约为 7 MW/11.3 MWh, 总投资约 2 亿元。

在削峰填谷工况下, 取锂电池的能量转换效率为 95%, SOC 可取 0~100%, 初始 SOC 设定为 0~100% 的变量, 计算得 25 年内, 储能系统需置换 1 次, 优化的 SOC 运行的为 [0.16, 0.8], 储容实际需求约为 0.215 MW/0.78 MWh, 总投资约 530 万元。

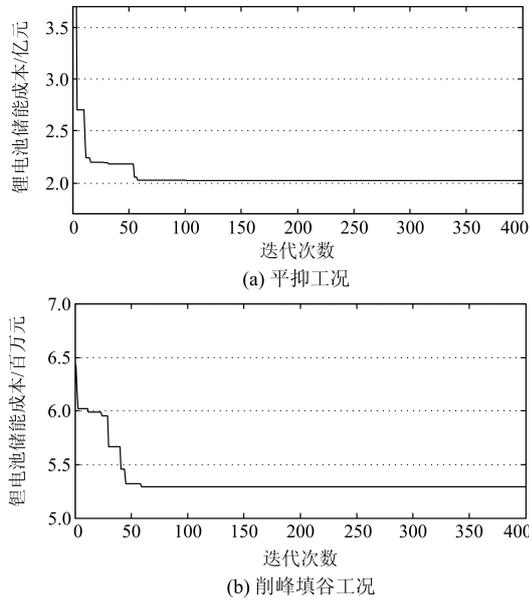


图 7 锂电池储能投资成本的迭代过程
Fig. 7 Iterative process of the investment of the lithium battery energy storage

图 8 为两种工况条件下，储能系统全寿命投资成本中各成本部分所占比例，对比分析，平抑工况下置换成本占总成本约 3/4，说明在该工况条件下，储能寿命损耗速度快，后期陆续投资成本大，而在削峰填谷工况下，初始购置成本占总投资成本的 1/2，在同样的规划期内，两种工况下储能投资的进度差异明显，所以在规划期，以全寿命周期为决策时间尺度，考虑不同工况差异性带来的后期投资成本差异是非常有必要的。

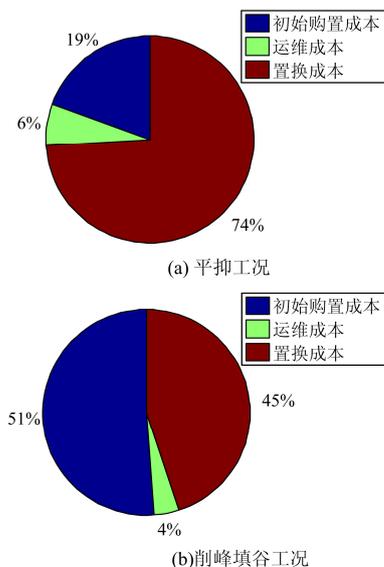


图 8 锂电池储能投资成本的分布情况
Fig. 8 Distribution of the investment cost of the lithium battery energy storage

4 结论

在考虑储能应用工况特征的基础上，开展锂电池储能系统经济性分析，以全寿命周期为研究时间尺度，通过建立计及工况特征的储能系统出力模型和储能系统成本模型，并以放电深度为例，开展工况差异性对储能系统总投资成本分布情况的影响，从算例结果可以看出，平抑与削峰填谷两种工况在充放电频次、充放电深度方面的差异较明显地体现在初始购置成本和置换成本在总成本中所占比重上。与工况特征的差异性一致，两种工况条件下储能系统的投资成本分布差异明显，这充分地说明了在储能规划阶段，考虑工况特征对全寿命周期内总投资成本和投资进度的影响是非常必要的。

参考文献

- [1] 栗然, 党磊, 周鸿鹄, 等. 基于费用效率法的风电场混合储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 55-62.
LI Ran, DANG Lei, ZHOU Honghu, et al. Capacity optimization disposition of hybrid energy storage in wind field based on cost efficiency model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 55-62.
- [2] FENG Lin, ZHANG Jingning, LI Guojie, et al. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 9pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0021-1
- [3] 张川, 杨雷, 牛童阳, 等. 平抑风电出力波动储能技术比较及分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 149-154.
ZHANG Chuan, YANG Lei, NIU Tongyang, et al. Comparison and analysis of energy storage technology to balance fluctuation of wind power output[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 149-154.
- [4] 吴昊, 王艳松. 基于智能单粒子算法的微电网经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 43-49.
WU Hao, WANG Yansong. Economic dispatch of microgrid using intelligent single particle optimizer algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 43-49.
- [5] 熊雄, 杨仁刚, 叶林, 等. 电力需求侧大规模储能系统经济性评估[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 224-230.
XIONG Xiong, YANG Rengang, YE Lin, et al. Economic evaluation of large-scale energy storage allocation in power demand side[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 224-230.
- [6] 向育鹏, 卫志农, 孙国强, 等. 基于全寿命周期成本的配电网蓄电池储能系统的优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 1224-1230.

- 2015, 39(1): 264-270.
- XIANG Yupeng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Life cycle cost based optimal configuration of battery energy storage system in distribution network[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 264-270.
- [7] 丁明, 王波, 赵波, 等. 独立风光柴储微网系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 575-581.
- DING Ming, WANG Bo, ZHAO Bo, et al. Configuration optimization of capacity of standalone PV-wind-diesel-battery hybrid microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 575-581.
- [8] 谢石骁, 杨莉, 李丽娜. 基于机会约束规划的混合储能优化配置方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 79-84.
- XIE Shixiao, YANG Li, LI Lina. A chance constrained programming based optimal configuration method of hybrid energy storage system[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 79-84.
- [9] 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]. Power Construction, 2013, 34(2): 1-5.
- [10] 虞胜东, 华寅飞, 胡志勇. 在智能电网体系下用户侧储能装置的经济性分析[J]. 电气自动化, 2013, 35(2): 62-64.
- YU Shengdong, HUA Yinfei, HU Zhiyong. Economic analysis of configured with energy storage device in the user-side of the smart grid system[J]. Electrical Automation, 2013, 35(2): 62-64.
- [11] 严干贵, 谢国强, 李军徽, 等. 储能系统在电力系统中的应用综述[J]. 东北电力大学学报, 2011, 31(3): 7-12.
- YAN Gangui, XIE Guoqiang, LI Junhui, et al. Review of energy storage system in electric power system[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2011, 31(3): 7-12.
- [12] 赵晶晶, 李振坤, 朱兰, 等. 储能系统在微网中的优化配置与成本分析[J]. 华东电力, 2011, 39(10): 1615-1618.
- ZHAO Jingjing, LI Zhenkun, ZHU Lan, et al. Optimal allocation and cost analysis of energy storage system in microgrid[J]. East China Electric Power, 2011, 39(10): 1615-1618.
- [13] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 91-97.
- HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 91-97.
- [14] 马会萌. 提高集中式光伏消纳能力的储能选型研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2016.
- MA Huimeng. Study on the selection of energy storage to improve the access ability of centralized photovoltaic power[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2016.
- [15] 时玮, 张言茹, 陈大分, 等. 锰酸锂电池寿命测试方法[J]. 汽车工程, 2015, 37(1): 67-71.
- SHI Wei, ZHANG Yanru, CHEN Dafen, et al. Lifespan test method for LiMn2O4 traction batteries[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(1): 67-71.
- [16] 陈继忠, 来小康, 惠东, 等. 全钒液流电池功率/能量响应能力的测试与分析[J]. 储能科学与技术, 2014, 3(5): 486-489.
- CHEN Jizhong, LAI Xiaokang, HUI Dong, et al. Testing and analyzing power-energy response capability of the vanadium redox flow battery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2014, 3(5): 486-489.
- [17] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[C] // Proceedings of the Royal Society, London, 1998: 903-995.
- [18] 马速良, 马会萌, 蒋小平, 等. 基于 Bloch 球面的量子遗传算法的混合储能系统容量配置[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 592-599.
- MA Suliang, MA Huimeng, JIANG Xiaoping, et al. Capacity configuration of the hybrid energy storage system based on bloch spherical quantum genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 592-599.
- [19] SCHALTZ E, KHALIGH A, RASMUSSEN P O. Influence of battery/ultracapacitor energy-storage sizing on battery life time in a fuel cell hybrid electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(8): 3882-3891.
- [20] LUNZ B, WALZ H, SAUER D U. Optimizing vehicle-to-grid charging strategies using genetic algorithms under the consideration of battery aging[C] // Vehicle Power and Propulsion Conference, September 6-9, 2011, Chicago, IL: 1-7.

收稿日期: 2016-10-17; 修回日期: 2017-03-13

作者简介:

马会萌(1985—), 女, 硕士, 研究方向为储能集成与配置技术; E-mail: mahuimeng@epri.sgcc.com.cn

李蓓(1983—), 女, 高级工程师, 研究方向为储能集成与配置技术; E-mail: libei@epri.sgc.com.cn

李建林(1976—), 男, 教授级高工, 研究方向为储能集成与配置技术。E-mail: dkylil@163.com

(编辑 姜新丽)