

考虑寿命损耗的微网电池储能容量优化配置

冯紫妍, 许仪勋, 汪凯琳, 殷煌凯

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对微电网中电池储能设备折损过快和容量配置过高的问题, 文中建立了考虑寿命损耗的微电网电池储能容量优化配置模型, 并提出了一种基于固定日循环次数的电池储能寿命损耗成本计算方法, 该方法结合了分段线性化思想和场景分析法, 可通过优化电池储能的放电深度和日循环次数从而有效延长其寿命年限。此外, 考虑到风光出力 and 负荷功率的不确定性, 文中引入了两阶段鲁棒优化模型, 并用列和约束生成算法求解。最后, 通过算例验证了新模型在不同不确定度和不同电池储能单位价格下的有效性。

关键词: 微电网; 两阶段鲁棒优化; 电池储能寿命; 容量配置

Optimal Configuration of Battery Energy Storage Capacity of Microgrid Considering Life Loss

FENG Ziyang, XU Yixun, WANG Kailin, YIN Huangkai

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Aimed at the problems of fast loss and high capacity configuration of battery energy storage equipment in microgrid, an optimal configuration model of battery energy storage capacity of microgrid considering life loss is established in this paper. In addition, a cost calculation method for the battery energy storage life loss based on fixed daily cycle times is also proposed. This method combines the piecewise linearization idea and the scenario analysis method, and it can effectively extend the lifetime by optimizing the discharging depth and daily cycle times of battery energy storage. Moreover, considering the uncertainties in wind power output and load power, a two-stage robust optimization model is introduced, which is further solved by the column-and-constraint generation algorithm. Finally, the effectiveness of the novel model under different uncertainties and different unit prices of battery energy storage is verified by numerical examples.

Keywords: Microgrid; two-stage robust optimization; battery energy storage life; capacity configuration

微电网作为一种整合分布式电源、提高可再生能源渗透率的手段, 一种传统电网向智能电网发展的过渡, 其发展受到了人们的广泛关注^[1-3]。而电池储能是微电网中的重要补充, 合理估计电池储能的寿命损耗情况, 优化电池储能的运行方式, 有利于提高整个微电网的经济性。

对于电池储能寿命损耗的研究, 部分研究者从

电池储能本身的寿命衰减机理出发, 研究运行过程中的各类因素对电池储能寿命的影响。如文献[4]选取折算系数、以交换功率衡量电池储能折损情况, 但是以固定的折算比例难以代表电池储能在运行过程中的动态变化。文献[5]提出了基于电池储能工作负荷的 Peukert 寿命能量吞吐量预测模型, 该模型在不完全循环情况下也可计算由于电池储能寿命等效损耗, 但模型复杂, 对模型求解要求较高。部分研究者则建立了有关电池储能寿命的经验或半经验模型, 如文献[6]采用四阶函数对电池储能的放电深度以及循环寿命的关系进行回归分析, 从而计算相应的电池储能寿命损耗。文献[7]通过锂电池老

收稿日期: 2021-02-18; 修回日期: 2021-04-07; 录用日期:

2021-04-15; 网络首发日期: 2021-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51807114)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 51807114

化测试的实验数据确定各类锂电池的寿命评估模型,并提出了根据制造商的数据调整模型系数的方法。文献[8]使用雨流计数法计算电池储能寿命折损费用,其非线性程度很高,仅适用于电池储能充放电曲线确定后对其损耗情况的评估,而无法通过优化电池储能的充放电情况而延长其寿命年限。

在忽略外部环境影响因素的前提下,电池储能的寿命损耗主要取决于其放电深度和循环次数^[9],而在微网规划中,新能源出力和负荷的不确定性将会对电池储能的充放电策略产生较大影响,因此,在考虑不确定性的同时研究电池储能的容量配置和寿命损耗十分有必要。

文中建立了考虑寿命损耗的微网电池储能容量优化配置模型。针对有限个日循环次数取值情况,可先固定电池储能日循环次数,利用场景分析法分别计算电池储能寿命损耗成本,优化了电池储能寿命年限。为解决风光出力和负荷功率的不确定性问题,文中又引入了两阶段鲁棒优化模型,先将非线性问题转化为一个 min-max-min 形式的混合整数线性问题,再将线性化后的模型通过强对偶理论以及列和约束生成 C&CG (column-and-constraint generation) 算法^[10],联合商用求解软件 Gurobi 求解。最终通过在算例中比较了是否引入电池储能寿命损耗成本、不同不确定度以及不同电池储能成本缩减比例下的电池储能容量、寿命年限和综合成本等指标,验证了文中所建模型的有效性。

1 基于固定日循环次数的电池储能寿命模型

1.1 电池储能寿命损耗成本计算

电池储能的循环寿命与放电深度的关系可由幂函数拟合得到

$$N_{\text{life}} = N_0(dod)^{-\alpha} \quad (1)$$

式中: N_{life} 为电池储能达到退役条件时的循环次数; N_0 为电池储能以 100%放电深度充放电时的循环次数; dod 为电池储能充放电循环的放电深度; α 为拟合得到的常数。 N_0 与 α 均为电池储能设备出厂固定参数。

若电池储能日循环次数 N_{day} 已知,则放电深度 dod 下,电池储能循环寿命的次数 N_{life} 与年限 T_{life} 折算关系为

$$T_{\text{life}} = \frac{N_{\text{life}}(dod)}{365N_{\text{day}}} \quad (2)$$

由于假定了微网电池储能的容量与最大功率存在固定的比值关系,如式(16),因此根据电池储能设备单位容量的价格计算其等年值投资成本为

$$C_{\text{int,per}} = \frac{\rho(1+\rho)^{T_{\text{life}}}}{(1+\rho)^{T_{\text{life}}} - 1} c_{\text{bat,int}} \quad (3)$$

式中: ρ 为折现率; $c_{\text{bat,int}}$ 为电池储能单位容量价格。

将单位容量电池储能设备的等年值投资成本平均分配在其循环寿命的每一天,即为单位容量电池储能的日寿命损耗成本。综合式(1)~式(3)可知, T_{life} 越小, dod 越大, N_{day} 越大,相应的电池储能的日寿命损耗成本越大,反之越小。当给定日循环次数 N_{day} 后,将电池储能循环放电深度分段线性化,可对每段分别拟合。第 d 个分段单位容量的日电池储能寿命损耗成本拟合参数为

$$B_d(N_{\text{day}}) = \frac{\rho(1+\rho)^{\frac{N_{\text{life}}(dod)}{365N_{\text{day}}}}}{(1+\rho)^{\frac{N_{\text{life}}(dod)}{365N_{\text{day}}} - 1}} \frac{C_{\text{bat,int}}}{365} \quad (4)$$

式中: B_d 为避免低估电池储能寿命损耗成本,取第 d 个分段的放电深度的上限 \overline{dod}_d 作为拟合目标中的放电深度。放电深度分段数 d 取 5。当 $N_{\text{day}}=0$ 时, $B_d=0$ 。

出于优化最大放电深度的目的,在优化运行问题中,电池储能日寿命损耗成本模型为

$$C_{\text{bat}} = E_{\text{bat,max}} \max_t \left[\sum_{d=1}^5 B_d(N_{\text{day}}) g_d(t) \right] \quad (5)$$

式中: $E_{\text{bat,max}}$ 为配置的电池储能容量; $g_d(t)$ 为放电深度分段 0/1 变量,若其取 1 则表示在 t 时刻电池储能的放电深度在第 d 个分段区间。

1.2 电池储能寿命模型相关约束

循环次数为

$$\begin{cases} N_{\text{day}} = \sum_{t=1}^{24} S_{\text{bat}}(t) \\ S_{\text{bat}}(t) = \max\{U_{\text{bat}}(t) - U_{\text{bat}}(t-1), 0\} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $S_{\text{bat}}(t)$ 为如果电池储能能在 t 时刻开始充电,计

为1,否则为0; $U_{\text{bat}}(t)$ 为 t 时刻电池储能系统充放电状态变量,1代表充电,0代表放电。日循环次数 N_{day} 在 $\{0,1,2,\dots,12\}$ 中取值。

放电深度为

$$\begin{cases} 1-\text{SOC}(t)=\sum_{d=1}^5 \text{dod}_d(t) \\ \text{dod}_d g_d(t) \leq \text{dod}_d(t) \leq \overline{\text{dod}_d} g_d(t) \\ \sum_{d=1}^5 g_d(t)=1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\text{dod}_d(t)$ 为电池储能系统第 t 个时段、第 d 个分段的放电深度; $\overline{\text{dod}_d}$ 、 $\underline{\text{dod}_d}$ 分别为第 d 个分段的放电深度的上、下限。

1.3 电池储能寿命年限的计算

采用雨流计数法,获得一个工作周期内电池储能的循环次数及放电深度,则电池储能循环寿命年限计算为

$$T_{\text{cycle}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{k_0} \left(\frac{1}{T_{\text{life},k}} + \frac{1}{T_{\text{life-half},k}} \right)} \quad (8)$$

$$\begin{cases} T_{\text{life},k} = \frac{N_{\text{life}}(\text{dod}_k)}{365} \\ T_{\text{life-half},k} = \frac{N_{\text{life}}(\text{dod}_{\text{half},k})}{0.5 \times 365} \end{cases} \quad (9)$$

式中: dod_k 、 $\text{dod}_{\text{half},k}$ 分别为电池储能第 k 个全循环、半循环周期对应的放电深度; $T_{\text{life},k}$ 、 $T_{\text{life-half},k}$ 分别为电池储能第 k 个全循环、半循环周期对应的寿命年限; k_0 为总循环周期数。

由文献[11]可知,电池储能的寿命年限分为循环寿命年限和浮充寿命年限,其实际寿命则以二者中的较小值为准,即

$$T_{\text{bat}} = \min\{T_{\text{cycle}}, T_{\text{float}}\} \quad (10)$$

式中: T_{bat} 、 T_{cycle} 和 T_{float} 分别为电池储能的实际寿命年限、循环寿命年限和浮充寿命年限。

2 确定型电池储能容量优化配置模型

2.1 目标函数

目标函数主要考虑了投资成本和运行成本两部

分,其中,投资成本主要为电池储能的等年值投资成本,运行成本则包括配电网交互成本(购售电成本)、各单元运维成本以及微型燃气轮机的燃料成本,即

$$\min C = \min\{C_{\text{int}} + C_{\text{ope}}\} \quad (11)$$

$$\begin{cases} C_{\text{int}} = \frac{\rho(1+\rho)^r}{(1+\rho)^r - 1} c_{\text{bat,int}} E_{\text{bat,max}} \\ C_{\text{ope}} = \sum_{i=1}^I 365k_i [C_{\text{bat},i} + C_{\text{grid},i} + C_{\text{om},i} + C_{\text{fuel},i}] \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} C_{\text{grid},i} = \sum_{t=1}^{24} [c_{\text{grid}}(t)P_{\text{buy},i}(t)\Delta t - c_{\text{grid}}(t)P_{\text{sell},i}(t)\Delta t] \\ C_{\text{om},i} = \sum_{t=1}^W \sum_{i=1}^{24} c_{\text{om},W} P_{W,i}(t)\Delta t \\ C_{\text{fuel},i} = \sum_{t=1}^{24} c_{\text{fuel}} P_{G,i}(t)\Delta t \end{cases} \quad (13)$$

式中: C 为综合成本; C_{int} 为电池储能等年值投资成本; C_{ope} 为微网年运行成本; ρ 为折现率; r 为折现年数; $c_{\text{bat,int}}$ 为电池储能单位容量投资成本; $E_{\text{bat,max}}$ 为电池储能配置容量; $C_{\text{bat},i}$ 、 $C_{\text{grid},i}$ 、 $C_{\text{om},i}$ 、 $C_{\text{fuel},i}$ 分别为第 i 个典日对应的电池储能寿命日损耗成本、购售电成本、各单元运维成本、燃料成本; c_{grid} 为电网电价; $c_{\text{om},W}$ 为第 W 种单元的运维成本系数。

2.2 各单元约束条件

2.2.1 微型燃气轮机

微型燃气轮机出力约束为

$$P_{G,\text{min}} \leq P_G(t) \leq P_{G,\text{max}} \quad (14)$$

式中, $P_{G,\text{min}}$ 、 $P_{G,\text{max}}$ 分别为微型燃气轮机出力的上下限,分别受其最小负载率和额定功率的限制。

2.2.2 配电网交互

微电网购电功率约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{buy}}(t) \leq U_{\text{grid}}(t)P_{\text{grid,max}} \\ 0 \leq P_{\text{sell}}(t) \leq [1 - U_{\text{grid}}(t)]P_{\text{grid,max}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_{\text{buy}}(t)$ 、 $P_{\text{sell}}(t)$ 分别为第 t 个时段微电网的购、售电功率; $P_{\text{grid,max}}$ 为微电网与配电网之间的联络线的交互功率上限; $U_{\text{grid}}(t)$ 为 t 时段微电网购售电状态变量;1代表购电;0代表售电。

2.2.3 电池储能

(1) 电池储能充放电功率约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{dis}}(t) \leq [1 - U_{\text{bat}}(t)] P_{\text{bat,max}} \\ 0 \leq P_{\text{ch}}(t) \leq U_{\text{bat}}(t) P_{\text{bat,max}} \end{cases} \quad (16)$$

$$P_{\text{bat,max}} = \mu E_{\text{bat,max}} \quad (17)$$

式中: $P_{\text{dis}}(t)$ 、 $P_{\text{ch}}(t)$ 分别为 t 时刻电池储能系统放电和充电功率; $P_{\text{bat,max}}$ 为电池储能充放电功率上限; μ 为电池储能功率上限和容量的固定比例系数。

(2) 电池储能荷电状态 SOC (state-of-charge) 约束为

$$\begin{cases} \text{SOC}(t) = \left[E(0) + \eta \sum_{t'=1}^t P_{\text{ch}}(t') \Delta t - \frac{1}{\eta} \sum_{t'=1}^t P_{\text{dis}}(t') \Delta t \right] / E_{\text{bat,max}} \\ \text{SOC}_{\text{min}} \leq \text{SOC}(t) \leq \text{SOC}_{\text{max}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: Δt 为时间步长, 文中取 1h; $E(0)$ 为电池储能初始电量; SOC_{max} 、 SOC_{min} 分别为电池储能的荷电状态上下限; η 为电池储能充放电效率。

(3) 充放电平衡约束

为便于在微电网运行中对电池储能进行调度, 要求调度周期 (本文取 24 小时) 始末的剩余电量一致, 即一个调度周期内电池储能的充放电需要相等, 为

$$\eta \sum_{t=1}^{24} P_{\text{ch}}(t) \Delta t - \frac{1}{\eta} \sum_{t=1}^{24} P_{\text{dis}}(t) \Delta t = 0 \quad (19)$$

(4) 最大允许安装容量约束为

$$0 \leq E_{\text{bat,max}} \leq s_{\text{bat,max}} \quad (20)$$

式中: $s_{\text{bat,max}}$ 为电池储能设备的最大允许安装容量, 受实际安装场地条件的影响。

2.2.4 功率平衡约束

功率平衡约束为

$$P_{\text{dis}}(t) - P_{\text{ch}}(t) + P_{\text{buy}}(t) - P_{\text{sell}}(t) + P_G(t) + u_{\text{PV}}(t) + u_{\text{WT}}(t) = u_L(t) \quad (21)$$

式中: $u_{\text{PV}}(t)$ 、 $u_{\text{WT}}(t)$ 、 $u_L(t)$ 分别为第 t 个时段的光伏、风机出力和负荷功率的不确定变量。

3 两阶段鲁棒优化模型

3.1 模型预处理

对式(5)电池储能日损耗寿命成本 C_{bat} 线性化为

$$C_{\text{bat,max}} \geq E_{\text{bat,max}} \sum_{d=1}^5 B_d(N_{\text{day}}) g_d(t) \quad (22)$$

对式(6)循环计数变量 $S_{\text{bat}}(t)$ 线性化为

$$\begin{cases} S_{\text{bat}}(t) \geq U_{\text{bat}}(t) - U_{\text{bat}}(t-1) \\ S_{\text{bat}}(t) \geq 0 \end{cases} \quad (23)$$

对于两阶段鲁棒问题中对偶处理及双线性项问题的解决^[12], 此处不再赘述。

3.2 等效模型和不确定集

为了解决微网中风光出力和负荷功率的不确定性, 文中将鲁棒思想引入 2.1 节和 2.2 节中的线性确定型模型, 构建了考虑电池储能寿命损耗的两阶段鲁棒优化模型, 可求得在风光出力和负荷功率最恶劣的场景下使得微电网综合成本最小的电池储能容量配置和出力方案, 其等效模型为

$$\begin{cases} \min_{E_{\text{bat,max}}, u} \{ C_{\text{int}} + \max_u \alpha \} \\ \text{s.t.} \begin{cases} (20) \\ \alpha = \min_{x, y, z, C_{\text{bat}}} C_{\text{ope}} \\ \text{s.t.} \begin{cases} (7)、(22) \sim (23) \\ (14) \sim (19)、(21) \end{cases} \end{cases} \end{cases} \quad (24)$$

式中: C_{int} 为投资成本, 是一阶段目标函数; $E_{\text{bat,max}}$ 为决策变量; $u = [u_{\text{WT}}(t) \ u_{\text{PV}}(t) \ u_L(t)]^T$ 为不确定变量; C_{ope} 为二阶段目标函数; $x = [U_{\text{bat}}(t) \ U_{\text{grid}}(t) \ g_1(t) \ \cdots \ g_5(t)]^T$, $y = [P_{\text{ch}}(t) \ P_{\text{dis}}(t) \ S_{\text{bat}}(t) \ P_{\text{buy}}(t) \ P_{\text{sell}}(t) \ P_G(t)]^T$, $z = [dod_1(t) \ dod_2(t) \ \cdots \ dod_{5,i}(t)]^T$ 和 C_{bat} 为二阶段决策变量。

由于微网系统中, 风光出力和负荷存在不确定性, 将其以上下界等比例缩放的盒式不确定集表示为

$$U = \{ (1-\tau)u_0 \leq u \leq (1+\tau)u_0 \} \quad (25)$$

式中: u_0 为风光出力和负荷功率的预测值; τ 为缩放比例, 即不确定度, 其为衡量不确定变量 (风光出力和负荷功率) 的不确定性的指标, 当对微网的鲁棒性要求越高时, 或风光出力和负荷功率的实际值与预测值的误差越大时, 不确定度取值越大。

4 模型求解

模型总体的求解思路如图 1 所示, 对各典型日

的电池储能日循环次数 $N_{day,i}$ 分别取固定值,在其排列组合后的场景下可分别求微电网系统综合成本 C ,最终输出综合成本最小时所对应的优化结果。

对于上述两阶段鲁棒优化模型,文中采用 C&CG 算法将之分解为主问题和子问题,交替求解。模型利用 yalmip 工具箱建立,子问题中调用了求解器 gurobi。C&CG 算法求解流程如图 2。

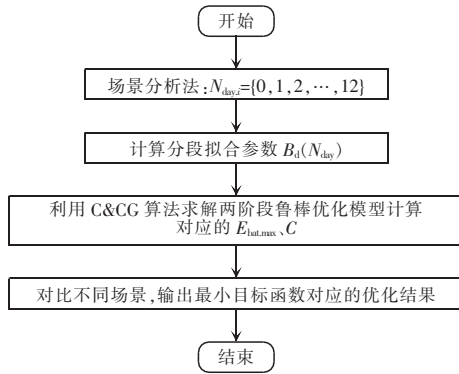


图 1 求解流程

Fig. 1 Flow chart of solution

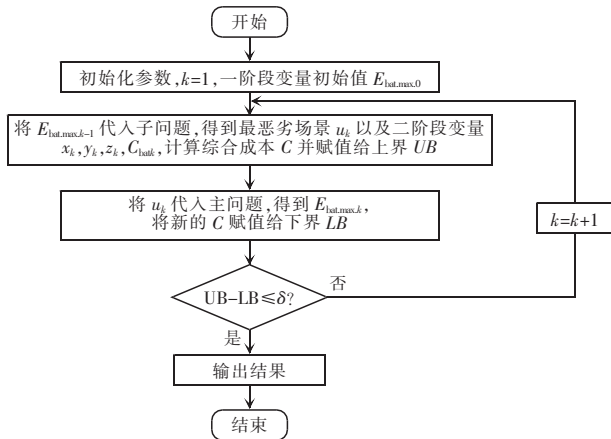
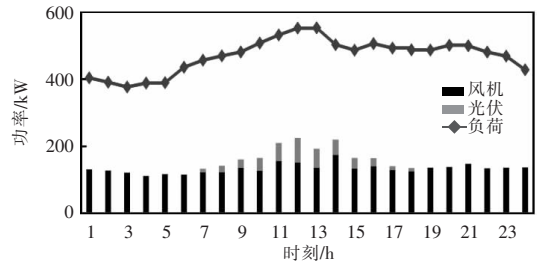


图 2 C&CG 算法求解流程

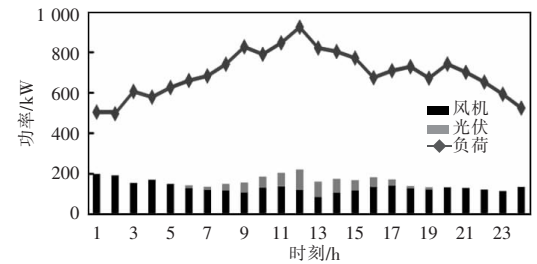
Fig. 2 Flow chart of C&CG algorithm

5 算例分析

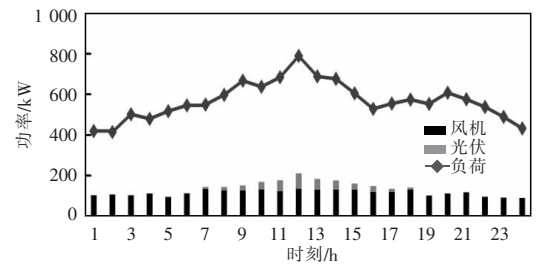
选取为期一年,采样步长为 1 小时的四季典型日风光出力数据和负荷功率数据如图 3 所示,选择磷酸铁锂电池作为微电网电池储能,其放电深度与循环次数的幂函数拟合曲线,如图 4 所示,其他微网相关参数如表 1 所示。高峰电价时段为 9:00-11:00 和 19:00-23:00,电价均为 1.35 元/kWh,低谷



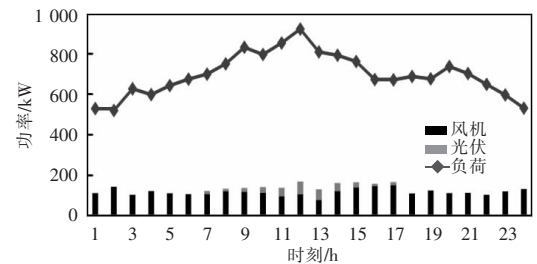
(a) 春季



(b) 夏季



(c) 秋季



(d) 冬季

图 3 四季典型日风光出力数据和负荷功率数据

Fig. 3 Typical daily wind power output and load power data in four seasons

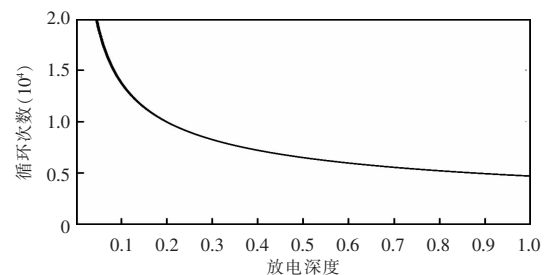


图 4 放电深度与循环次数的幂函数拟合曲线

Fig. 4 Power function fitting curve of discharge depth and cycle number

电价时段为 24:00~8:00 和 12:00~18:00, 电价分别为 0.48 元/kWh 和 0.9 元/kWh。

5.1 引入电池储能寿命损耗成本的优势及日循环次数取值的影响

建立不考虑电池储能寿命损耗成本的模型(A 模型), 即

$$\begin{cases} \min_{E_{bat,max}} \{C_{int} + \max_u \beta\} \\ \text{s.t.} \begin{cases} (20) \\ \beta = \min_{\substack{U_{bat}, U_{max}, P_{dis}, \\ P_{ch}, P_{low}, P_{sd}, P_c}} (C_{grid} + C_{om} + C_{fuel}) \\ \text{s.t.} (14) \sim (19), (21) \end{cases} \end{cases} \quad (26)$$

将前文建立的考虑电池储能寿命损耗模型(式(24))与式(26)进行对比, 当不确定度取 0.05 时, B 模型优化计算中, 列举了几种四季典型日的日循环次数取不同值时的电池储能配置结果及对应的综合成本, 如表 2 所示。

表 1 微网相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of microgrid

参数	数值
$c_G / (\text{¥/kWh})$	0.6
$c_{om,WT} / (\text{¥/kWh})$	0.029 6
$c_{om,PV} / (\text{¥/kWh})$	0.009 6
$c_{om,G} / (\text{¥/kWh})$	0.059
$c_{om,bat} / (\text{¥/kWh})$	0.009
ρ	8%
$r / \text{年}$	10
$c_{bat,int} / (\text{¥/kWh})$	1 107
η	0.95
μ	0.21
SOC_{\min}	0.1
SOC_{\max}	0.9
$P_{G,\min} / \text{kW}$	10
$P_{G,\max} / \text{kW}$	200
$P_{grid,\max} / \text{kW}$	500

表 2 日循环次数的影响

Tab. 2 Effect of daily cycle times

$[N_{day,1}, N_{day,2}, N_{day,3}, N_{day,4}]$	储能容量/kWh	综合成本/万元
[1, 1, 1, 1]	1 285	435.47
[1, 1, 2, 2]	774	396.15
[2, 2, 2, 2]	510	374.75
[2, 3, 2, 3]	529	381.09

注: $[N_{day,1}, N_{day,2}, N_{day,3}, N_{day,4}]$ 分别为春、夏、秋、冬各典型日的电池储能日循环次数。

由表 2 可知, 相比于其他日循环次数取值情况, $[N_{day,1}, N_{day,2}, N_{day,3}, N_{day,4}] = [2, 2, 2, 2]$ 对应的电池储能容量配置和综合成本均为最低, 说明在日循环次数取值过大或过小均不能使得微电网的经济性最优, 并且会导致储能的充放电情况与需平抑的微电网小时级不平衡功率匹配程度降低, 从而不得不增加其容量配置。比较 A 模型与 B 模型的优化结果, 其电池储能容量和综合成本如表 3 所示。

表 3 储能寿命损耗成本的影响

Tab. 3 Effect of energy storage life loss cost

模型	储能容量/kWh	综合成本/万元
A($\tau=0$)	1 436	326.96
B($\tau=0$)	251	337.73
A($\tau=0.05$)	1 055	360.48
B($\tau=0.05$)	510	374.75

在引入电池储能寿命损耗成本后, 电池储能的容量配置明显降低, 综合成本上升, $\tau=0$ 时, 电池储能容量降幅为 82.52%, 综合成本增幅为 3.29%, $\tau=0.05$ 时, 电池储能容量降幅为 51.66%, 综合成本增幅为 3.96%, 说明了若忽略电池储能寿命损耗成本, 容易过多配置电池储能容量, 且低估了综合成本。

图 5~图 8 为确定性模型和鲁棒模型最优容量

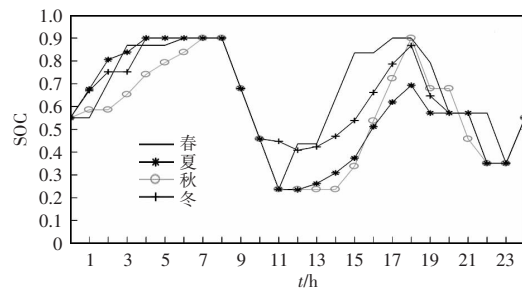


图 5 A 模型荷电状态($\tau=0$)

Fig. 5 SOC of Model A($\tau=0$)

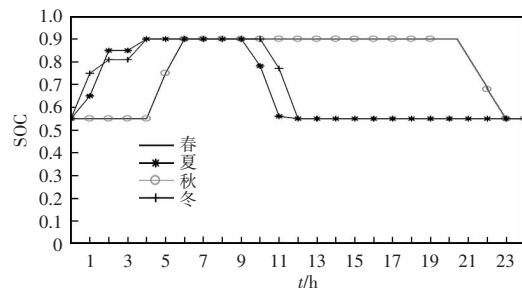


图 6 B 模型荷电状态($\tau=0$)

Fig. 6 SOC of Model B($\tau=0$)

配置下的电池储能荷电状态,由此可知,取 $\tau=0$ 时,A 模型平均荷电状态为 0.62,最大放电深度为 0.76,B 模型平均荷电状态为 0.74,最大放电深度为 0.45。取 $\tau=0.05$ 时,A 模型平均荷电状态为 0.632,最大放电深度为 0.9,B 模型平均荷电状态为 0.675,最大放电深度为 0.65。

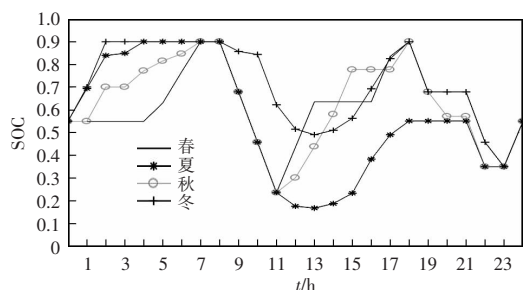


图 7 A 模型荷电状态($\tau=0.05$)

Fig. 7 SOC of Model A($\tau=0.05$)

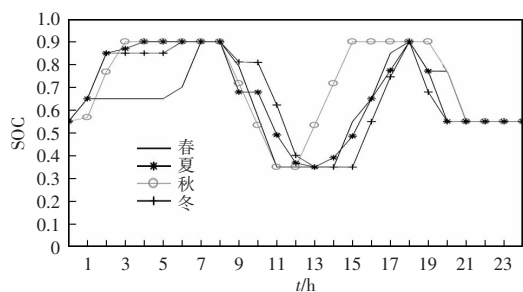


图 8 B 模型荷电状态($\tau=0.05$)

Fig. 8 SOC of Model B($\tau=0.05$)

5.2 不确定度的影响

5.2.1 不确定度对电池储能容量配置的影响

当不确定度分别取 0、0.05、0.10、0.15 时,A、B 两类模型电池储能容量优化配置结果如表 4 所示。

表 4 不同不确定度下的储能容量配置

Tab. 4 Energy storage capacity configuration under different uncertainties

τ	A 模型储能容量/kWh	B 模型储能容量/kWh
0	1 436	251
0.05	1 055	510
0.10	814	771
0.15	1 532	1 473

纵向对比,A 模型配置的电池储能容量随着不确定度的增大先增大后减小,而 B 模型配置的电池储能容量则是与不确定度呈正相关。

横向对比,在不同不确定度下,A 模型配置的电池储能容量均高于 B 模型,且二者配置的电池储能容量逐渐接近。

这是由于随着不确定度的增加,相当于微电网系统的净负荷增加,为满足更加恶劣的出力场景,需要增加从电网的购电量。经计算,A 模型的联络线利用率(购电)^[13]在不同不确定度下分别为 0.63、0.66、0.75、0.83、0.89。可见,由于联络线功率上限的限制,购电比例上升,而相应的通过售电盈利的比例下降,相应的 A 模型中电池储能对系统经济性的正面作用也逐渐减弱。因此,在不确定度为 0 和 0.05 时,A 模型由于不计电池储能寿命损耗,低估了微电网的运行成本,过于乐观地配置大量电池储能,期望借此实现套利,而 B 模型则由于计及了电池储能寿命损耗成本,在优化中发现无法通过电池储能低储高发实现盈利的目的,因此为降低微电网的综合成本从而少配置了电池储能。在不确定度为 0.1 和 0.15 时,由于联络线功率上限的限制,A 模型电池储能的盈利空间进一步被压缩,因此其容量的过配程度逐渐减弱,与 B 模型配置的电池储能容量也越来越接近。

5.2.2 不确定度对电池储能寿命年限的影响

计算电池储能寿命年限,结果如表 5 所示。证明了在不同的不确定度下,引入电池储能寿命损耗成本后均有助于延长电池储能的寿命年限,避免实际微网运行过程中电池储能损耗过快的问题。

表 5 不确定度对储能寿命年限的影响

Tab. 5 Effect of uncertainty on lifetime of energy storage

τ	A 模型储能循环寿命年限(实际寿命年限)/年	B 模型储能循环寿命年限(实际寿命年限)/年
0	8.29(8.29)	52.08(10)
0.05	8.19(8.19)	10.47(10)
0.10	8.03(8.03)	9.39(9.39)
0.15	6.35(6.35)	6.82(6.82)

由式(10)可知,电池储能的实际寿命年限= $\min\{\text{循环寿命年限,浮充寿命年限}\}$,在本文中设定电池储能的浮充年限为固定值 10 年,则在表 5 中 B 模

型在不确定度分别为 0 和 0.05 时,由式(8)和(9)计算所得的电池储能循环寿命年限均大于其浮充寿命年限,因此,这两种情况下电池储能的实际寿命年限取后者。

5.3 电池储能单位价格的影响

随着技术的发展,电池储能成本会进一步降低,因此文中探讨不同电池储能成本缩减比例下, $\tau=0.05$ 时计及电池储能寿命损耗成本的模型(B 模型)的电池储能容量配置情况、综合成本以及电池储能寿命损耗成本,如表 6 所示。

表 6 储能成本缩减对储能容量配置的影响

Tab. 6 Effect of energy storage cost reduction on energy storage capacity configuration

缩减比例	储能容量/ kWh	综合成本/ 万元	储能寿命损耗 成本/万元
0.9	438	373.57	6.97
0.7	481	369.64	7.17
0.5	510	364.56	7.48

当电池储能单位成本不断缩减,电池储能的配置容量升高,综合成本降低。例如,当电池储能单位成本分别缩减至原成本的 0.9、0.7 和 0.5 时,电池储能的优化配置容量不断增加,相应的储能寿命损耗成本也不断增加,而综合成本则不断减少,说明当电池储能单位成本越低时,微网系统越倾向于配置更多的电池储能,以合理付出电池储能寿命损耗成本的方式来达到总体经济性最优的目的。

6 结论

文中建立了考虑电池储能寿命损耗成本的微网电池储能容量优化配置模型,并提出了一种基于固定日循环次数的电池储能寿命模型,利用两阶段鲁棒优化解决了风光出力和负荷功率的不确定性问题,最终通过场景分析法以及列和约束生成算法求解。现有以下结论:

(1)引入以日循环次数和放电深度为决策变量的电池储能寿命模型后,其寿命年限在各典型日出力场景下均得到一定程度的延长。

(2)随着不确定度的增加,电池储能在微网配置中的占比也随之增大,为平衡功率需要牺牲一定的电池储能寿命来保证经济性。但在配置及运行优化结果方面,文中模型依旧优于不计电池储能寿命损耗成本的模型。

(3)电池储能单位成本的降低会促使微网配置更多的电池储能以使得综合成本最小,电池储能容量和单位成本的变化均会影响电池储能寿命损耗成本。

参考文献:

- [1] 刘文, 杨慧霞, 祝斌. 微电网关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 152-155.
Liu Wen, Yang Huixia, Zhu Bin. Survey on key technologies of microgrid [J]. Power System Protection and Control, 2012,40(14): 152-155 (in Chinese).
- [2] Zhang Yawen, Zhou Xianyuan. Research on optimal configuration of hybrid energy storage based on RTDS microgrid [J]. Journal of Anhui Electrical Engineering Professional Technique College, 2019, 24(1): 168-175.
- [3] Goodall G, Scioletti M, Zolan A, et al. Optimal design and dispatch of a hybrid microgrid system capturing battery fade [J]. Optimization and Engineering, 2019, 20(1): 179-213.
- [4] Shi Yuanyuan, Xu Bolun, Wang Di, et al. Using battery storage for peak shaving and frequency regulation: joint optimization for superlinear gains [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2882-2894.
- [5] Tran D, Khambadkone A M. Energy management for lifetime extension of energy storage system in micro-grid applications [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1289-1296
- [6] 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): 83-89.
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): 83-89 (in Chinese).
- [7] Xu Bolun, Alexandre O, Andreas U, et al. Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment [J].

- IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1131-1140.
- [8] 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(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(24): 55-62 (in Chinese).
- [9] 陈健, 王成山, 赵波, 等. 考虑储能系统特性的独立微电网系统经济运行优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 25-31.
- Chen Jian, Wang Chengshan, Zhao Bo, et al. Economic operation optimization of a stand-alone microgrid system considering characteristics of energy storage system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 25-31 (in Chinese).
- [10] Zeng B, Zhao L. Solving two-stage robust optimization problems using a column-and- constraint generation method [J]. Operations Research Letters, 2013, 41(5): 457-461.
- [11] 王鸿麟. 现代通信电源[M]. 北京:人民邮电出版社, 1998.
- Wang Honglin. Modern Communication Power [M]. Beijing: The Posts and Telecommunications Press, 1998(in Chinese).
- [12] 刘一欣, 郭力, 王成山. 微电网两阶段鲁棒优化经济调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4013-4022, 4307.
- Liu Yixin, Guo Li, Wang Chengshan. Economic dispatch of microgrid based on two stage robust optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4013-4022, 4307 (in Chinese).
- [13] 武志锴, 许言路, 蒋理, 等. 基于离散傅里叶变换的微电网混合储能容量优化[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2018, 45(2): 32-38.
- Wu Zhikai, Xu Yanlu, Jiang Li, et al. Hybrid energy storage capacity optimization of microgrid based on discrete fourier transform [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2018, 45(2): 32-38 (in Chinese).



冯紫妍

作者简介:

冯紫妍(1994-),女,通信作者,硕士。研究方向:微电网规划与储能优化运行。E-mail:fengziyan_fzy@163.com。

许仪勋(1969-),男,博士,讲师。研究方向:微电网规划与运行和智能用电。E-mail:xu_yixun@sina.com。

汪凯琳(1997-),女,硕士。研究方向:微电网混合储能优化配置。E-mail:3349301040@qq.com。

殷煌凯(1995-),男,硕士。研究方向:智能用电。E-mail:1622175131@qq.com。