

基于退役电池的用户侧储能备用电源配置方法

赵宇明¹, 程俊杰², 熊小伏², 丁庆¹, 马政², 陈红州²

¹深圳供电局有限公司, 广东 深圳

²输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆

收稿日期: 2021年9月23日; 录用日期: 2021年10月8日; 发布日期: 2021年10月25日

摘要

退役动力电池仍具有一定容量, 仍可作为储能应用于用户侧。退役电池梯次利用于用户侧储能系统, 可以有效提升动力电池的使用寿命, 降低储能系统成本, 提高资源利用率, 使动力电池价值最大化。在规划阶段考虑梯次电池容量保持率以及循环寿命的影响, 考虑了梯次电池储能系统作为备用电源对负荷的支撑作用并与柴油发电机成本进行对比, 以储能装置全寿命周期经济效益最大化为目标函数, 构建了基于退役电池的用户侧储能备用电源配置的混合整数线性规划模型。以某一商业用户为例, 基于退役电池的用户侧储能备用电源配置方法具有显著的经济效益, 验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词

退役动力电池, 梯次利用, 配电网, 用户侧储能规划

Configuration Method of User-Side Energy Storage Backup Power Supply Based on Retired Batteries

Yuming Zhao¹, Junjie Cheng², Xiaofu Xiong², Qing Ding¹, Zheng Ma², Hongzhou Chen²

¹Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

²State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing

Received: Sep. 23rd, 2021; accepted: Oct. 8th, 2021; published: Oct. 25th, 2021

Abstract

Retired power batteries still have a certain capacity and can still be used as energy storage on the user side. Retired batteries are used in the user-side energy storage system step by step, which can

文章引用: 赵宇明, 程俊杰, 熊小伏, 丁庆, 马政, 陈红州. 基于退役电池的用户侧储能备用电源配置方法[J]. 智能电网, 2021, 11(5): 364-372. DOI: 10.12677/sg.2021.115035

effectively improve the service life of power batteries, reduce the cost of energy storage system, improve resource utilization and maximize the value of power batteries. In the planning stage, the influence of battery capacity retention rate and cycle life is considered, the supporting role of battery energy storage system as backup power supply to load is considered and compared with the cost of diesel generator. The objective function is to maximize the economic benefit of the whole life cycle of energy storage device. A mixed integer linear programming model for the configuration of user-side energy storage backup power supply based on retired batteries was constructed. Taking a commercial user as an example, the user-side energy storage backup power configuration method based on retired batteries has significant economic benefits, which verifies the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords

Retired Power Battery, Cascade Utilization, Distribution Network, User-Side Energy Storage Planning

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 电动汽车因其促进节能减排、环境友好、缓解能源危机等优点, 得以快速发展, 高比例电动汽车将成为汽车行业未来发展趋势。然而, 电动汽车数量的爆发式增长, 大规模的动力电池将从电动汽车上退役, 给社会带来了新的问题, 预计到 2025 年将有 52.4 GWh、约 60 万吨退役电池需要处理。这些电池的容量衰减到了原有容量的 70%~80%, 无法满足电动汽车的使用需从电动汽车上退役, 如果直接报废回收, 是对资源的极大浪费, 并且可能会对环境造成污染[1] [2] [3]。

退役动力电池的储能能力使其仍具有极大的实用价值, 通过回收、筛选、重组后, 其仍可梯次利用于对电池性能要求不高的领域中, 能够显著降低储能系统成本, 同时降低退役动力电池的回收压力, 提升动力电池的使用寿命, 实现资源的最大化利用[4]。储能设备作为能源互联网的重要要素之一, 采用退役动力电池集成的储能系统在能源互联网发展的大背景下将具有广阔的应用空间[5]。

针对退役动力电池的梯次利用问题, 国内外的研究主要集中于梯次利用的可行性、经济性分析, 基于退役动力电池梯次利用的储能系统应用场景容量配置优化等方面。文献[6]充分考虑动力电池的充放电深度和电池寿命衰减, 计及需求响应策略, 研究了梯次储能系统在主动配电网中的优化配置。文献[7]建立了家用能量系统模型, 构建了梯次储能容量优化模型, 基于改进粒子群算法和模糊控制算法对梯次储能容量进行优化。文献[8]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, 采用改进的遗传算法对模型进行求解, 但该研究假设储能系统寿命为固定值, 也没有考虑电池性能衰减对系统经济性的影响。文献[9]在多储能场景下分析场景更迭时梯次电池容量保持率的变化以及梯次电池供求关系的变化对储能系统净收益的影响, 构建了退役电池在多储能场景下梯级利用的经济性评估模型, 并采用遗传算法求解模型。文献[10]采用雨流计数法统计电池工作周期内的充放电深度, 并根据等效循环寿命曲线建立电池寿命损耗模型, 以充电站日成本最低为目标, 综合考虑充电站配电网的投资成本、储能系统的投资成本、维护成本及整体的运行成本, 利用粒子群优化算法求解最优容量。

综上所述，现有文献大多以经济性为储能容量配置规划的目标，但是针对退役动力电池的容量保持率与循环寿命对储能系统全寿命周期经济性的影响，以及梯次电池储能系统作为备用电源的价值尚未研究。因此，本文提出一种考虑退役电池寿命周期内最优经济性的梯次利用储能系统的容量配置方法与运行方式。根据动力电池的寿命模型，得到退役动力电池梯次利用储能系统的循环寿命特性。充分考虑梯次电池储能系统通过峰谷电价差套利以及作为备用电源对负荷的支撑作用，并与柴油发电机作备用电源相对比，保证了梯次电池储能系统的价值得到充分发挥。以梯次电池储能系统全寿命周期内经济效益最大化为目标，建立了考虑梯次电池储能系统投资运行成本、峰谷电价差套利、减少失负荷收益以及柴油发电机成本的混合整数线性规划配置模型(Mixed-integer Linear Programming, MILP)。

2. 退役电池梯次利用寿命分析

退役动力电池的梯次利用对电池管理系统提出了更高的要求，由于动力电池的化学体系、生产厂家、规格、批次、健康状态复杂[4]，如何延长退役电池的使用寿命是关键。综合上输影响因素分析退役电池寿命较为困难，储能电池的寿命主要受到温度、充放电深度(Depth of Discharge, DOD)、循环次数等因素的影响。退役电池的寿命估计是梯次利用的重要环节，对储能系统的容量保持率、使用年限等指标都有直接影响。动力电池全寿命周期价值如图 1 所示。

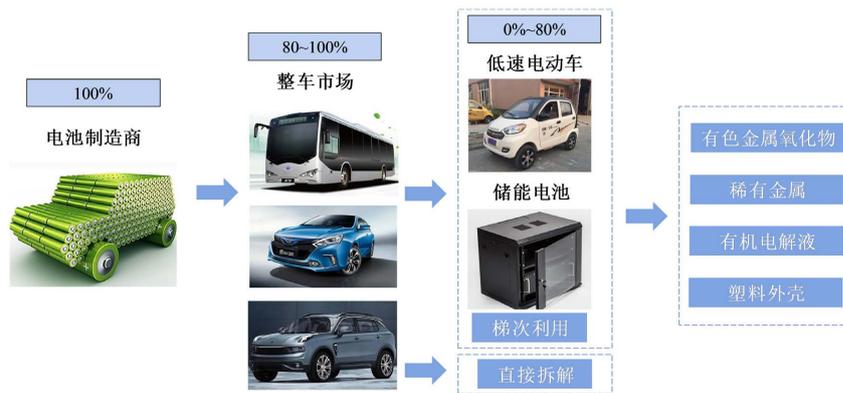


Figure 1. Life cycle value diagram of power battery
图 1. 动力电池全寿命周期价值图

文献[10]对某一型号的磷酸铁锂电池进行了放电深度与循环寿命的测试，从拆解和二次循环测试结果来看，退役磷酸铁锂电池与新电池相比，未出现加速衰退的情况，并由此预测出梯次利用退役电池时，其容量保持率与循环寿命的关系。

$$\beta = -2.6043 * 10^{-5} * N + 0.8347 \tag{1}$$

式中， β 为退役动力电池容量保持率， N 为退役动力电池的充放电循环次数。

假设梯次利用动力电池初始容量保持率为 β_1 ，梯次利用终止时的容量保持率为 β_2 ，根据式(1)可以得到相应的退役电池循环次数 N_1 与 N_2 ，则梯次利用退役电池用于储能系统的寿命可由式(2)计算得到

$$T_r^{ESS} = \frac{N_2 - N_1}{365 * N_{peak}} \tag{2}$$

式中， T_r^{ESS} 表示梯次利用电池的寿命(单位为年)， N_{peak} 表示日峰荷次数。

根据梯次电池储能系统所产生的使用价值与场规储能电池的价值相对较，可以简单估算其单位容量价格：

$$C_r^{ESS} = C^{ESS} \cdot \frac{T_r^{ESS}}{T^{ESS}} \quad (3)$$

式中, C_r^{ESS} 表示梯次电池储能系统单位容量价格, C^{ESS} 表示常规储能系统单位容量价格, T^{ESS} 表示常规储能系统的寿命。

3. 基于退役电池的用户侧储能备用电源配置方法

3.1. 目标函数

梯次利用退役动力电池储能系统作为储能装置的一种形式, 其主要功能与场规储能装置是一致的。综合考虑梯次储能装置通过峰谷电价差套利带来的收益、作为重要负荷的备用电源带来的价值以及投资和运行维护成本等因素, 对梯次利用储能系统的经济效益进行分析, 其全寿命周期收益为:

$$F = \sum_{y=1}^Y \left(\frac{1+i_r}{1+d_r} \right)^y (F_{y,pl}^{ESS} + F_{loss}) - F_{inv}^{ESS} - \sum_{y=1}^Y \left(\frac{1+i_r}{1+d_r} \right)^y F_{ope}^{ESS} - F_b^{DG} - \sum_{y=1}^Y \left(\frac{1+i_r}{1+d_r} \right)^y F^{fuel} \quad (4)$$

式中, F 为梯次利用储能系统的全寿命周期收益, Y 表示规划期年数, y 代表第 y 年, i_r 表示通货膨胀率, d_r 表示贴现率, $F_{y,pl}^{ESS}$ 表示全寿命周期内梯次电池储能系统第 y 年通过峰谷电价差套利收益, F_{loss} 表示全寿命周期内梯次电池储能系统减少的失负荷成本, F_{inv}^{ESS} 表示梯次电池储能系统的投资成本, F_{ope}^{ESS} 表示梯次电池储能系统年运行维护成本, F_b^{fuel} 表示柴油发电机的购置成本, F^{fuel} 表示柴油发电机运行成本。

梯次电池储能系统通过峰谷电价差套利带来的收益可由式(5)计算:

$$F_{y,pl}^{ESS} = 365 \sum_{t=1}^{24} P_t \cdot (-p_{y,t}^{ch} + p_{y,t}^{dis}) \quad (5)$$

式中, $t \in \{1, 2, 3, \dots, 22, 23, 24\}$, 表示一天中对应的小时, P_t 表示第 t 小时的电价, $p_{y,t}^{ch}$ 表示梯次电池储能系统第 y 年第 t 小时的充电功率, $p_{y,t}^{dis}$ 表示梯次电池储能系统第 y 年第 t 小时的放电功率。

$$F_{loss} = \sum_{t=1}^T P_{pu,t} \cdot P_{loss,t} \quad (6)$$

式中, T 为一年 8760 小时, $P_{pu,t}$ 表示负荷点失负荷的成本系数, $P_{loss,t}$ 表示负荷点第 t 小时的负荷缺失功率。

失负荷概率是衡量电力系统可靠性的重要指标之一, 其反应了电力短缺的可能性, 为了表示电力短缺的严重程度, 通常用一个周期内总缺失负荷量与总负荷需求量的比值表示

$$L_{olp} = \frac{\sum_{t=1}^T P_{loss,t}}{\sum_{t=1}^T P_{load,t}} \quad (7)$$

式中, L_{olp} 表示负荷点的失负荷概率, $P_{load,t}$ 表示负荷点第 t 小时的负荷需求功率。

$$F_{inv}^{ESS} = (1-\gamma) \cdot C_r^{ESS} \cdot S^{ESS} \quad (8)$$

式中, γ 为回收系数, S^{ESS} 为梯次电池储能系统的额定容量。

$$F_{ope}^{ESS} = c^{ope} \cdot C_r^{ESS} \cdot S^{ESS} \quad (9)$$

式中, c^{ope} 梯次电池储能系统单位容量年运行维护成本系数。

柴油发电机在配电网中作为应急或备用电源起到重要作用, 其发电成本中大部分为燃料成本, 可将柴油发电机的耗油量描述为输出功率的线性函数:

$$f_{DE} = \alpha P_{DE} + \beta P_{DE, \text{rated}} \quad (10)$$

式中, f_{DE} 为柴油发电机单位时间的耗油量(L/h), P_{DE} 、 $P_{DE, \text{rated}}$ 分别为柴油机的输出功率和标称功率(kW), α 、 β 分别为油耗—功率曲线中的斜率和截距系数(L/kWh), 本文选取 $\alpha = 0.08415$, $\beta = 0.2461$ 。

$$F_b^{DG} = N_{DG} \cdot P_{DG} \quad (11)$$

式中, N_{DG} 表示柴油发电机的购置数量, P_{DG} 表示柴油发电机的单价。

$$F^{fuel} = C_{fuel} \cdot f_{fuel} + E_{DG} \cdot \sum_{w=1}^W P_w \cdot G_w \quad (12)$$

式中, C_{fuel} 为柴油单价, f_{fuel} 为柴油发电机的年耗油量; E_{DG} 为柴油发电机年发电量, W 为柴油发电机排放污染物的种类数, P_w 、 G_w 为柴油发电机的污染物排放系数与治理费用系数。

3.2. 约束条件

规划模型的约束条件考虑梯次电池储能系统的运行约束, 主要包括充放电功率约束、充放电守恒约束以及荷电状态约束。其中, 梯次电池储能系统的荷电状态约束考虑了梯次电池容量保持率的逐年变化。

1) 充放电功率约束

$$0 \leq p_{y,t}^{ch} \leq P_{\max} \quad (13)$$

$$0 \leq p_{y,t}^{dis} \leq P_{\max} \quad (14)$$

2) 充放电守恒约束

$$\sum_{t=1}^{24} p_{y,t}^{ch} = \sum_{t=1}^{24} p_{y,t}^{dis} \quad (15)$$

3) 荷电状态约束

假设梯次电池储能系统处于日循环运行方式, 即

$$SOC_{y,0}^{ESS} = SOC_{y,24}^{ESS} \quad (16)$$

$$0.1 \cdot SOC_{\max,y} \leq SOC_{y,t}^{ESS} \leq 0.9 \cdot SOC_{\max,y} \quad (17)$$

$$c_{y,t} + d_{y,t} \leq 1 \quad (18)$$

$$SOC_{y,t}^{ESS} + \left(\eta_{ch} \cdot p_{y,t}^{ch} - \frac{p_{y,t}^{dis}}{\eta_{dis}} \right) \Delta t = SOC_{y,t+1}^{ESS} \quad (19)$$

$$SOC_{y,t}^{ESS} \geq T_s \cdot P_{load,t} \quad (20)$$

式中, $SOC_{y,t}^{ESS}$ 为梯次电池储能系统在第 y 年、第 t 小时的荷电状态(State of Charge, SOC), $SOC_{\max,y}$ 表示梯次电池储能系统在第 y 年的容量; $c_{y,t}$ 表示梯次电池储能系统在第 y 年、第 t 小时的充电状态的 0/1 变量, 若为 1 则充电, 否则不充电; $d_{y,t}$ 表示梯次电池储能系统在第 y 年、第 t 小时的放电状态的 0/1 变量, 若为 1 则放电, 否则不放电; η_{ch} 表示梯次电池储能系统充电时的效率, η_{dis} 表示梯次电池储能系统放电时的效率; T_s 表示梯次电池储能系统作为备用电源时需要支撑负荷运行的时间。

$$SOC_{\max,y} = S^{ESS} \cdot \frac{\beta_y}{\beta_{st}} \quad (21)$$

式中, β_y 表示梯次电池储能系统在第 y 年时的容量保持率, β_{st} 表示梯次电池储能系统的初始容量保持率。

3.3. 规划模型及求解

综上所述，储能规划模型可表示为：

max (4)

s.t. 式(13)-式(21)

上述模型属于混合整数线性规划(MILP)，可用 CPLEX、GUROBI 等求解器有效求解。本文在 MATLAB 平台上，借助 YALMIP 工具包编写相关程序，并调用 CPLEX 求解器对模型进行求解。

4. 算例分析

为验证本文所提方法的有效性，选取某一商业负荷作为研究对象进行算例分析。

算例采用文献[11]中的商业负荷曲线，如图 2 所示。表 1 所示为深圳市峰谷电价。假设算例中商业负荷的年最大负荷为 2 MW，其乘以图 1 中给出的对应负荷系数可以得到该商业负荷 24 小时负荷。

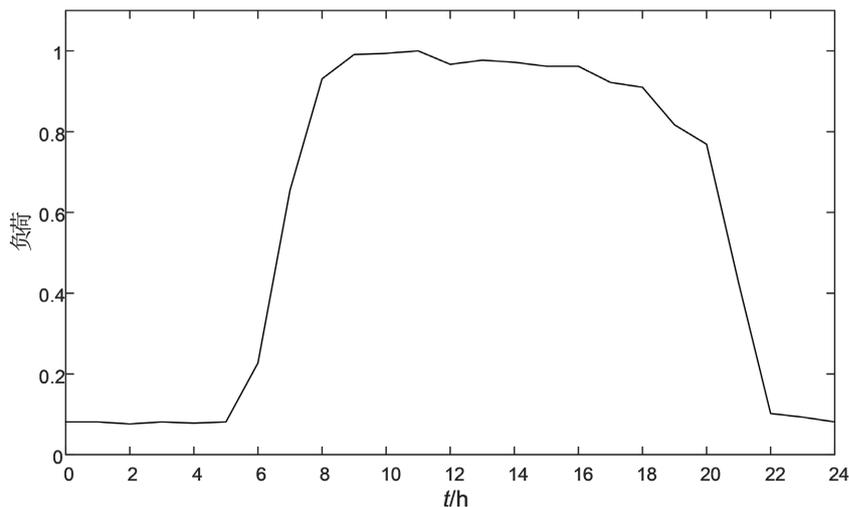


Figure 2. Typical commercial load curve

图 2. 典型商业负荷曲线

Table 1. Time-of-use tariff for customers

表 1. 用户峰谷电价表

时段	时间	电价(元/kwh)
谷	0:00~8:00	0.3377
	8:00~14:00	
平	17:00~19:00	0.6648
	22:00~24:00	
峰	14:00~17:00	1.0900
	19:00~22:00	

退役动力电池储能系统相较于常规储能系统来说购买成本较低，算例中配置的梯次电池为电动汽车上退役的磷酸铁锂电池，并假设所购买的退役动力电池初始可用容量为 70%，终止时剩余容量为 60%，每日峰荷次数 $N_{peak} = 2$ ，带入式(1)、(2)中可以得到梯次电池储能系统的寿命为 5 年。设定常规储能电池单位容量价格为 2500 元/(kW·h)，使用寿命为 10 年，则根据式(3)可以简单估算梯次点出储能系统单位容量价格为 1250 元/(kW·h)。梯次电池储能系统初始剩余电量设置为 0.2，充放电效率为 0.9，每小时最大

充放电量为其最大容量的 20%，设定梯次电池储能系统作为备用电源能够支撑负荷运行 10 分钟。设定规划年限为 10 年，梯次电池储能系统和柴油发电机参数如表 2 所示[12]。

Table 2. Main parameters of cascade battery storage system and diesel generator
表 2. 梯次电池储能系统和柴油发电机主要参数

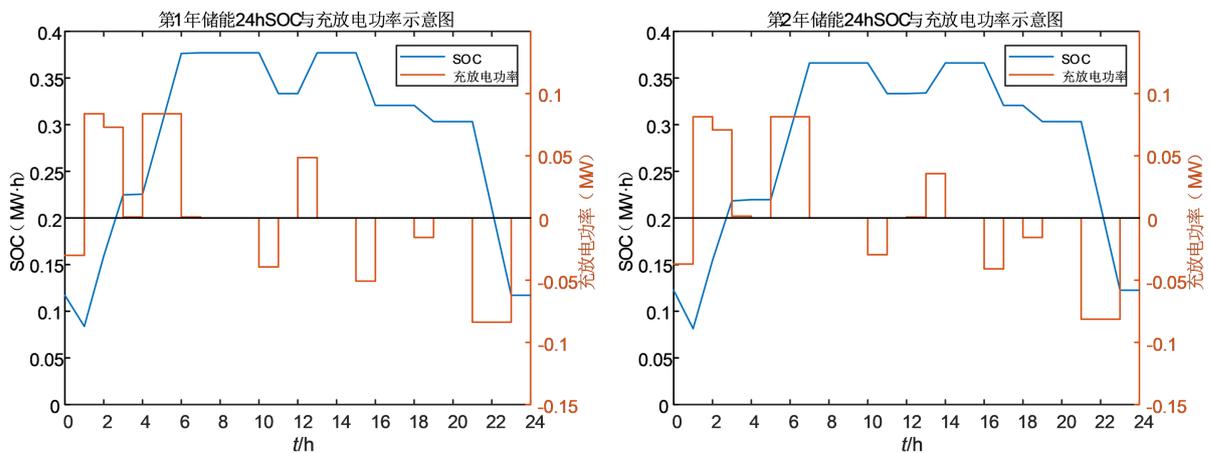
梯次电池储能系统		柴油发电机	
参数名称	参数值	参数名称	参数值
退役动力电池单位容量价格	1250 元/(kW·h)	规格	500kW
梯次电池储能系统寿命	5 年	初始投资费用	29 万元/台
梯次电池储能系统年运维系数	0.02	运维费用	30(元/kW·年)
		使用寿命	10 年

柴油发电机所排放的主要气体污染物的排放系数、治理标准如表 3 所示。柴油价格为 6.13 元/L，贴现率为 10%，通货膨胀率为 2%，且固定不变。负荷点全年失负荷概率 L_{olp} 设为 1%，缺电惩罚的折算系数设为 1.7 元/kW·h [13]。

Table 3. Pollutant discharge or emission, pollution control standards
表 3. 污染物排放、治理标准

污染物种类	排放系数/(g/kW·h)	治理费用系数/(元/kg)
NO _x	8.662	27.54
SO ₂	0.928	6.49
CO	4.64	1.12
CO ₂	464.074	0.092

通过求解本文建立的基于退役电池的用户侧储能规划模型，得到储能规划结果如图 3 所示。十年规划期内，梯次电池储能系统配置容量为 419 kW·h，功率为 84 kW，带来的收益为 178.15 万元，其中减少的失负荷成本 118.71 万元，梯次电池储能系统成本为 52.37 万元，运行维护成本为 7078 元，配置梯次电池储能系统后能够满足作为备用电源支撑负荷点运行 10 分钟，所以不需要额外购买柴油发电机。若不配置梯次电池储能系统，为了保证负荷点的供电，需要额外配备 4 台柴油发电机，十年规划期内的柴油发电机成本 257.64 万元，其中柴油发电机购置成本 116 万元，运行维护成本 40.55 万元，发电消耗柴油成本 80.67 万元，污染物治理成本 20.42 万元，能够减少失负荷成本 118.71 万元，总的来看，需要额外支出 138.93 万元。



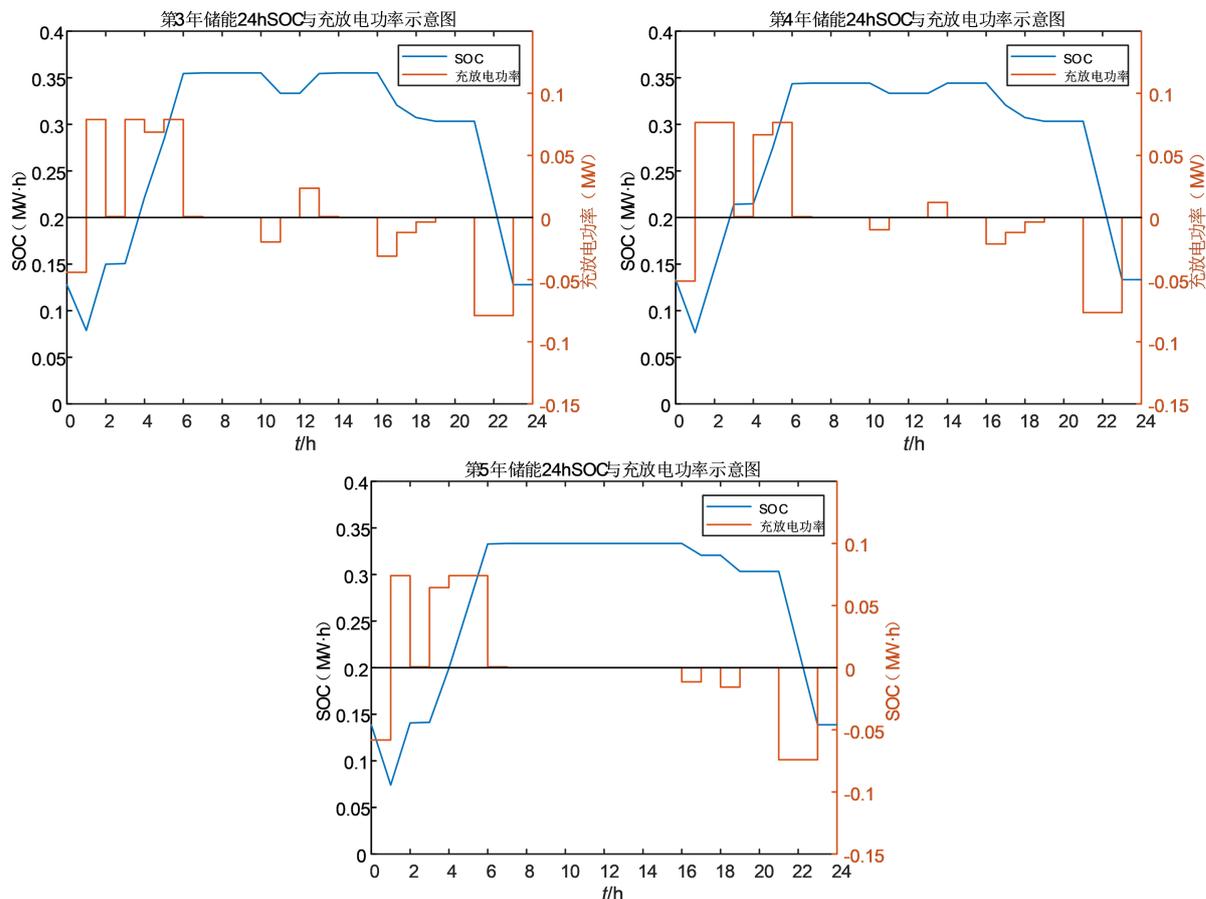


Figure 3. Diagram of SOC and charge-discharge power in retired battery life cycle
图 3. 梯次电池寿命周期内 SOC 与充放电功率示意图

综上所述，由于梯次电池储能系统具有较低成本和较强的灵活性，可以作为重要负荷的备用电源，相较于传统的柴油发电机具有明显的经济性优势。通过算例可以验证，本文提出的基于退役电池的用户侧储能备用电源配置方法是有意义的。

5. 总结

储能系统具有效率高、响应速度快和灵活性强等优势，退役电池储能系统相较于常规储能系统成本进一步降低，未来的应用前景广阔。本文提出一种基于退役电池的用户侧储能备用电源配置方法，以储能的容量、功率、运行方式为决策变量，以储能全寿命周期下的经济效益最大为目标，建立了用户侧储能混合整数线性规划配置模型(MILP)，并基于 Cplex 求解器进行了优化求解，结果显示与配置柴油发电机的成本相比，利用退役电池储能系统作为备用电源能够降低成本、增加收益，经济优势较为明显。

配电网中各类型电力用户负荷具有明显季节周期性特性，后续可以对各种负荷的季节特性进行研究，并据此划分不同运行场景，并得出不同季节场景下的用户侧储能运行方式。

基金项目

中国南方电网有限责任公司科技项目《退役电池梯次利用系统示范应用和梯次利用动力电池再退役标准研究(国重项目自筹)》，项目编号 090000KK52190271。

参考文献

- [1] 王秉刚. 中国清洁汽车行动的成就与展望[J]. 汽车工程, 2005, 27(6): 643-647.
- [2] Neubauer, J., Smith, K., Wood, E., *et al.* (2015) Identifying and Overcoming Critical Barriers to Widespread Second Use of PEV Batteries. National Renewable Energy Lab (NREL), Golden.
- [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.
- [4] 刘坚. 电动汽车退役电池储能应用潜力及成本分析[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(2): 243-249.
- [5] 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.
- [6] 吴鸣, 孙丽敬, 寇凌峰, 等. 考虑需求侧响应的主动配电网电池梯次储能的容量配置方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 71-79.
- [7] 王帅, 尹忠东, 田硕文, 等. 基于退役动力电池的家庭储能容量优化配置[J]. 电测与仪表, 2020, 57(9): 58-64+88.
- [8] 韩晓娟, 张姍, 修晓青, 李建林. 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.
- [9] 许欣慧, 舒征宇, 李世春. 基于退役电池在多储能场景下梯级利用的经济运行研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(12): 58-64.
- [10] 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.
- [11] 尚龙龙, 魏碧桢, 王伟, 等. 主动配电网储能动态配置规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 84-92.
- [12] 张姍. 计及梯次利用电池的储能优化规划[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [13] 邵志芳, 赵强, 张玉琼. 独立型微电网源荷协调配置优化[J/OL]. 电网技术, 1-12. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.2028>, 2021-09-24.