

储能系统与工程

退役动力锂电池在光储微电网的集成与应用

徐余丰¹, 严加斌², 何建明¹, 琚正伟¹, 程 革², 郑 达², 邹印龙², 叶 磊², 王建新³

(¹浙江辉博电力设备制造有限公司, 浙江 衢州 324407; ²宁波中科孚奇能源科技有限公司;

³中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201)

摘要:为实现退役动力锂电池在光储微电网系统中的集成与应用,从整包利用的角度出发,检查80 V-60 A·h电池包的外观、铭牌、开路电压、BMS通讯情况对其进行初选,通过充放电测试对电池包完成二次筛选,并依据容量大小对电池进行分组,结合多通道储能变流器将电池成组,应用于光储微电网系统中。结果显示:80个电池包有8个存在外观、开路电压和BMS通讯问题,22个存在容量和 C_D -OCV曲线异常。剩余50个电池包容量最大值为49.46 A·h,容量最小值为45.58 A·h,极差值为3.88 A·h,占额定容量的6.5%,一致性较好;在0.1、0.2、0.3、0.5 C等不同倍率下对电池进行充放电,成组后的电池 C_D -OCV曲线离散度较小;按0.05 C倍率充电、0.1 C倍率放电进行削峰填谷,充电量为111 kW·h,放电量为103 kW·h,转化效率92.79%。表明筛选和成组后的电池充放电性能正常,具备梯次利用价值。

关键词:退役动力锂电池;整包利用;光储微电网

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0251

中图分类号: TM 911.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2021) 01-349-06

Integration and application of retired LIBs in photovoltaic and energy storage micro grid

XU Yufeng¹, YAN Jiabin², HE Jianming¹, JU Zhengwei¹, CHENG Ge², ZHENG Da², ZOU Yinlong²,

YE Lei², WANG Jianxin³

(¹Zhejiang Huibo Power Equipment Manufacturing Co. Ltd., Quzhou 324407, Zhejiang, China; ²Ningbo Zhongke Fuqi Energy Technology Co. Ltd.; ³Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, Zhejiang, China)

Abstract: To fulfill integration and application of retired Li-ion batteries in a PV and energy storage micro grid system, from the perspective of whole package using, checking appearance, nameplate, open circuit voltage (OCV), BMS communication of the 80 V-60 A·h batteries for initial filtration, then finishing second filtration through charging and discharging batteries, sorting batteries in accordance with valid capacity, grouping batteries by multichannel power conversion system (PCS), then applying in a PV and energy storage micro grid system. The results show the following: There are eight batteries that have a problem with appearance, OCV, or communication of the BMS, and 22 batteries also cannot be reused due to the capacity and the CD-OCV curve being unqualified. In the 50 remaining batteries, the maximum capacity is 49.46 A·h, and the minimum capacity is 45.58 A·h; so, the difference in value is 3.88 A·h, which is only 6.5% of the rated capacity, meaning these batteries present good uniformity.

收稿日期: 2020-07-15; 修改稿日期: 2020-07-30。

基金项目: 宁波市科技创新2025重大专项-分布式储能电站关键技术及工程示范项目 (2018B10024)。

第一作者: 徐余丰 (1972—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 分布式

电力储能系统集成与应用, E-mail: x6771@163.com; 通信作者: 严加斌, 工程师, 智能微电网与分布式电力储能研究, E-mail: niufen_2013@163.com。

By charging and discharging under different rates, such as 0.1, 0.2, 0.3 and 0.5 C, the dispersion of the CD-OCV curves is small after grouping; when charging at a rate of 0.05 C and discharging at a rate of 0.1 C for peak cutting and valley filling, the charging energy is 111 kW·h and the discharging energy is 103 kW·h; so, the efficiency is 92.79%. This shows that the characteristics of the batteries are normal after filtrating and grouping, and the batteries have cascade utilization value.

Key words: retired Li-ion battery; whole package use; photovoltaic and energy storage micro grid

统计数据显示,截至2019年底,全国新能源汽车保有量达381万辆,占汽车总量的1.46%。其中,纯电动汽车保有量310万辆,占新能源汽车总量的81.19%。一般来说,车载动力电池容量低于80%就不再适合用于电动汽车^[1]。随着产业规模还在不断扩大,中国将迎来车载动力电池的大规模“退役”。根据相关行业的专家预测,预计在2020年累计将超过24.6 GW·h,而到2022年动力电池回收量将接近45 GW·h^[2]。

此类动力电池除了化学活性下降外,电池内部的化学成分没有发生改变。当动力电池容量衰退至初始容量75%左右时,直流内阻只有小幅增加,电池常温下的储存性能、倍率性能、高低温性能下降不显著,电池单体和模块的循环性能良好,显示退役LiFePO₄电池具有较好的梯次利用价值^[3]。

目前,对于退役电池的梯次利用的研究,主要为退役电池的筛选评价和电池组一致性管理两个方面。在退役电池的筛选评价上,文献[4-5]提出将电池容量、平衡电动势与放电直流内阻等特征参数作为退役电池梯次利用的分选指标。文献[6]在测得上述各项电池参数的基础上,将遗传算法和K均值算法结合,对电池进行筛选分类。文献[7]则从电化学角度出发,分析库仑效率和电池容量衰减之间的内在关系,提出基于库仑效率对退役动力锂电池储能梯次利用进行筛选的方法。

在电池组一致性管理研究方面,朱运征等^[8]采用独特共用母线的主动均衡设计,提出了基于电源总线平衡的多因素综合评价分析的均衡策略。赵光金等^[9]提出了一种智能分时的主动被动协同均衡技术,实现了对梯次电池的高效和快速均衡。黄从胜等^[10]设计了一种新型均衡电路,解决了现有大型电池组均衡电路均衡时长、效率低的问题。

本文从退役动力锂电池整包利用的角度出发,分析了退役动力锂电池梯次利用的全过程。以80 V-60 A·h磷酸铁锂电池包为例,从电池包外观、

铭牌、开路电压、BMS通讯等方面对电池包进行初选,再对电池包进行充放电获得电池包的容量和C_D-OCV(discharge capacity and open circuit voltage)曲线,根据容量值和电压曲线对包进行二次筛选。将筛选后的电池包按照容量大小进行排序,并根据排序结果对电池包进行分组。利用多通道储能变流器将分组好的电池包进行串联成组得到储能系统,并联合分布式光伏系统组建光储微网电站,实现退役电池的梯次利用。通过在不同倍率下对电池进行充放,依据C_D-OCV曲线的离散情况,验证了筛选和成组方案的可行性。

1 电池筛选

本项目选用从换电站退役的80 V-60 A·h磷酸铁锂电池包,这批电池于2011年10月出厂,2018年底陆续退役。其电芯采用中航锂电3.2 V-60 A·h方形铝壳磷酸铁锂电池,由24个电芯串联的方式得到电池包。电池包内部结构图如图1所示。

电池包主要技术参数如表1所示。

从电池包的外观、铭牌、开路电压、BMS通讯

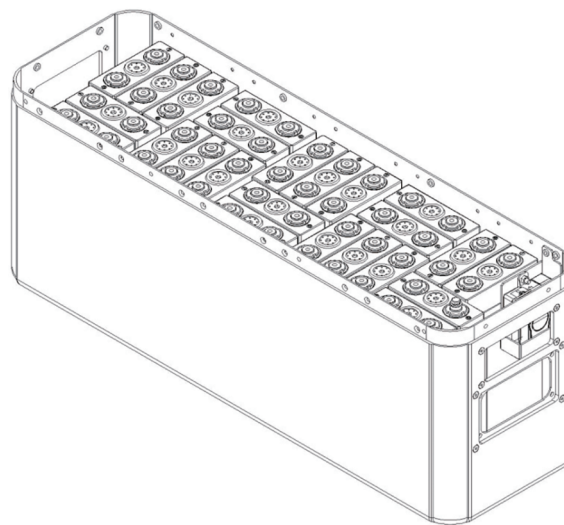


图1 80 V-60 A·h 磷酸铁锂电池包

Fig.1 80 V-60 A·h Li-ion battery

表 1 退役动力锂电池规格参数

Table 1 Specifications of retired Li-ion battery

序号	项目	参数	序号	项目	参数
1	额定电压/V	80	5	最大放电电流/A	180
2	额定容量/A·h	60	6	充电最高电压/V	87.6
3	重量/kg	61	7	放电截止电压/V	60
4	最大充电电流/A	60	8	交流内阻/mΩ	<40

等方面对电池包进行初选,对外观有缺陷、铭牌信息缺失、开路电压超出额定充电截止电压的80%~110%范围、BMS无法正常通讯的电池包予以剔除^[11]。经检测,在80个电池包当中存在3个电池包外观有破损,4个电池包开路电压超出额定充电截止电压的80%~110%,1个电池包BMS无法通讯的情况,没有通过初选,剩下72个电池包进入到二次筛选环节。电池包初选不合格情况如图2所示。



图2 电池包初选结果
Fig.2 Results of initial filtration

对剩下的电池包进行一次充放电。考虑到电池为退役电池,设置充电电流为0.3 C,放电电流为1 C,充电截止电压87.6 V(单体3.65 V),放电截止电压70 V(单体2.9 V)。放电结束后,得到电池包的容量和 C_D -OCV曲线,判定电池放电容量在额定容量的75%以上, C_D -OCV曲线未出现“跳水”现象的电池包合格,可以进入梯次利用环节。经测试后,72个电池包有22个电池包存在容量不合格及 C_D -OCV曲线异常的情况,剩下50个电池包符合要

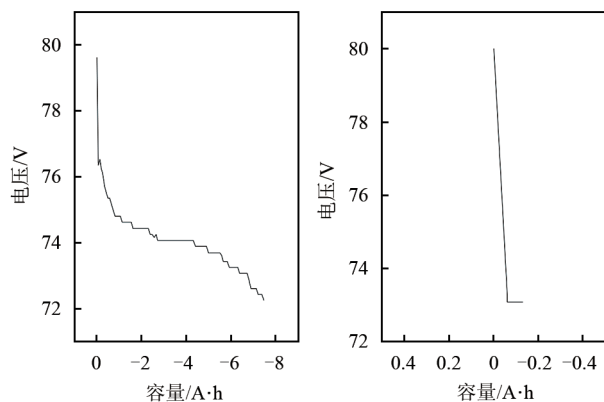


图3 容量不符合及 C_D -OCV曲线“跳水”的电池包
Fig.3 Capacity unqualified and C_D -OCV curve "diving"

求。电池包二次筛选不合格情况如图3所示。

2 电池分组与成组

2.1 电池分组

退役动力电池包容量极差小于额定容量的10%,认为这部分电池包具有较好的一致性^[12-14]。二次筛选后的50个电池包容量最大值为49.46 A·h,容量最小值为45.58 A·h,极差值为3.88 A·h,占额定容量的6.5%,表征该50个电池包具有较好的一致性。将电池包按照容量大小进行排序,根据电池容量的分布情况,选择容量最接近的36个电池包进行成组,剩余14个电池包留着备用。电池包的编号和容量分布如图4所示。

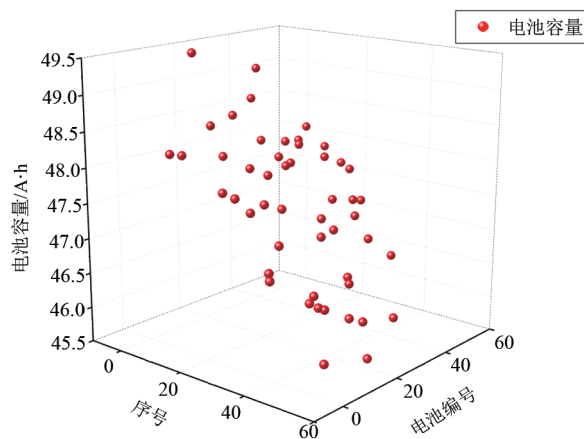


图4 电池包容量和编号分布图
Fig.4 The distribution of batteries' capacity and its number

2.2 电池成组

选用多通道储能变流器作为光储电站中的交直流转换设备,其具有DC/DC+DC/AC两级式拓扑结构,在电池端无并联,可以避免电池组间环流的产生,适用于对退役电池进行成组。将配组完的80 V-60 A·h电池包4个组成一串,形成320 V/19.2 kW·h储能单元,接入到30 kW储能变流器的一个直流通路,单个通道功率10 kW。整个储能系统共9个直流通路,储能容量90 kW/172.8 kW·h。系统结构如图5所示。

3 光储系统集成

将90 kW/172.8 kW·h储能系统同50 kWp分布式光伏系统在交流侧并联,并通过快速并离网切换开关接入到厂区0.4 kV交流母线上,构成光储微电网系统。其中,分布式光伏系统采用单晶硅组件,串

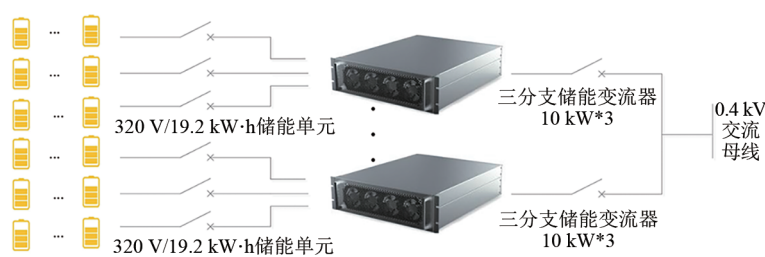


图5 90 kW/172.8 kW·h 储能系统

Fig.5 90 kW/172.8 kW·h energy storage system

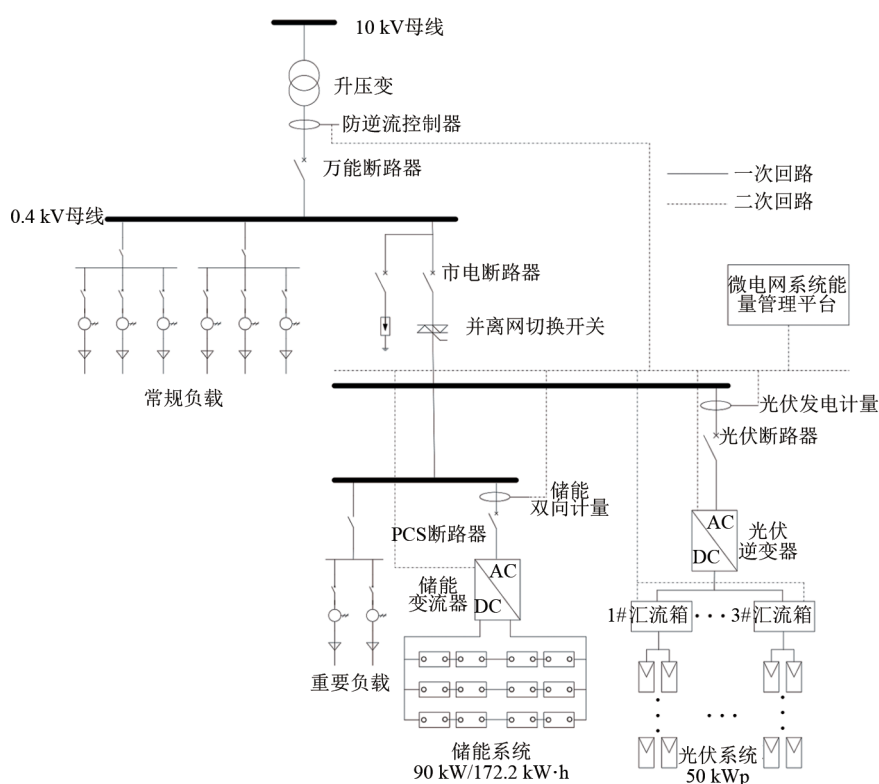


图6 光储微电网系统拓扑图

Fig.6 Topology of PV and energy storage micro grid system

联后经过直流汇流箱接入到组串式光伏逆变器中，与储能系统在交流侧耦合。储能变流器的交流输出端同时关联部分重要负载，在市电异常时，由光储系统保障重要负载的供电。光储系统拓扑图如图6所示。

系统集成能量管理系统，用于制定光储系统在并网和离网两种工况下的运行控制策略。并网时，储能变流器和光伏逆变器均以有功无功解耦(P/Q)方式运行，由EMS根据电价时段控制储能充放电，实现削峰填谷。同时，在储能放电期间，检测公共连接点(PCC)的反向功率。当出现反向功率时，由EMS给储能系统发降功率命令，防止储能放出的电进入电网，实现逆功率保护。

离网时，由储能、光伏、负载组建微网方式运行。此时，储能变流器以恒压恒频(V/F)方式运行，建立幅值和频率稳定的电压，光伏逆变器以 P/Q 方式运行，以电流源的方式注入微网系统。EMS根据负载的大小，来协调光伏和储能的出力，维持系统稳定、持续运行。

4 试运行结果

4.1 多倍率下电池组充放电

在不同倍率下对电池组进行多个循环周期的恒功率充放电，利用电池管理系统记录每组中各个电池包的放电容量及电压值，得到电池的 C_D -OCV曲线，根据曲线的离散情况对电池成组配组情况进行

验证。

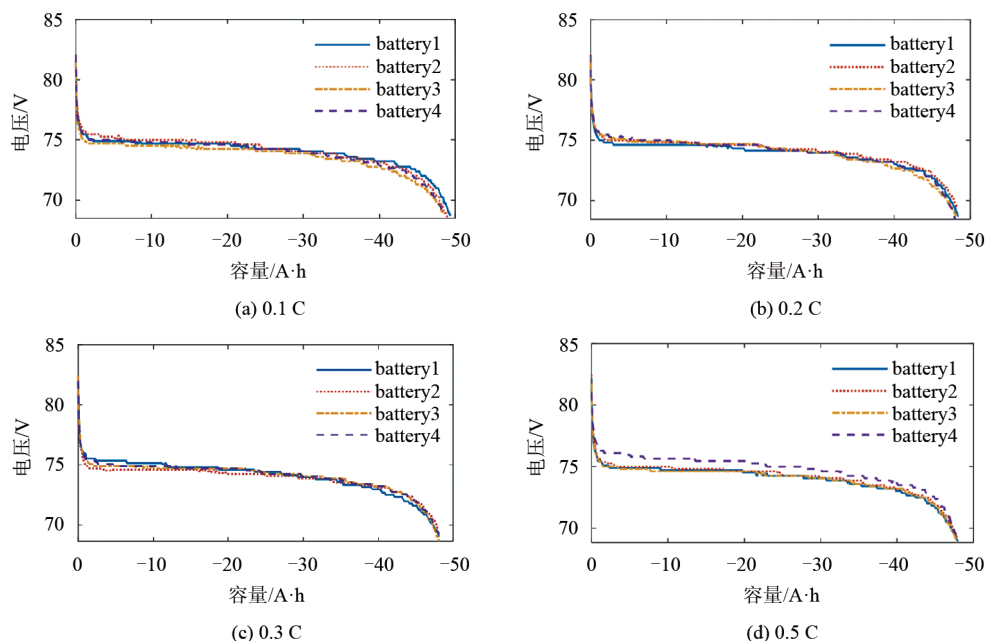


图7 不同放电倍率下, 同组电池的 C_D -OCV曲线

Fig.7 C_D -OCV curve of same group batteries under different discharging rate

可见, 依据电池包有效容量和电芯一致性排序后, 在0.1、0.2、0.3 C放电倍率下, 电池包的 C_D -OCV曲线基本吻合; 在0.5 C倍率下, 曲线有一定偏差, 但总体趋势相近, 符合工程应用的要求, 可以依据排序结果对电池进行配组。

4.2 削峰填谷

将筛选并成组后的退役动力锂电池应用于光储微电网系统中, 设置电池放电倍率为0.1 C, 充电倍率为0.05 C, 并依据当地峰谷电价时段进行充放电, 实现削峰填谷, 运行结果如图8所示。

从图中可见电池成组后, 在0.1 C倍率条件下

电池组电压从放电开始时刻(18:00)的320.69 V下降至316.16 V, 这是由于电池由原来的开路状态变为带负载状态引起的跌落。之后电池组电压随着放电的持续平缓地下降, 直至到达放电截止时间(21:30), 此时对应电池组电压为306.22 V, 总放电量103 kW·h。停止放电后, 电池组电压由306.22 V回升至308.82 V, 充电后(22:00—次日3:00)电池组电压逐渐恢复到额定电压, 总充电量111 kW·h, 转化效率92.79%。

5 结论

通过对退役电池包的筛选、分组、成组以及在光储微电网系统中的集成与应用, 完成了退役动力锂电池梯次利用全过程的分析研究, 得出了以下结论。

(1) 对80个退役动力锂电池包从外观、铭牌、开路电压、BMS通讯等方面进行初选, 其中3个电池包外观有破损, 4个电池包电压超出额定充电截止电压的80%~110%, 1个电池包BMS无法通讯; 剩下72个电池包中有22只存在容量不符合额定容量的75%以上或 C_D -OCV曲线“跳水”的情况, 只有50个电池包符合梯次利用价值。

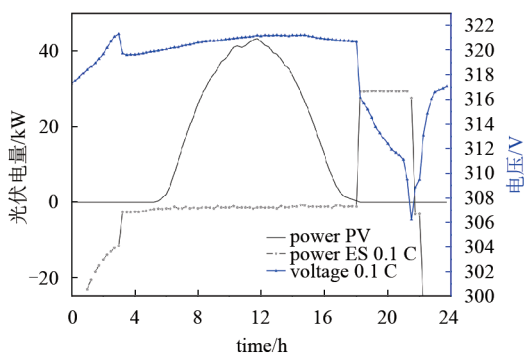


图8 光储微电网削峰填谷运行

Fig.8 PV and energy storage micro grid system operates for peak-cutting

(2) 二次筛选后的50个电池包容量最大值为49.46 A·h, 容量最小值为45.58 A·h, 极差值为3.88 A·h, 占额定容量的6.5%, 小于10%的判定标准, 表征该50个电池包具有较好的一致性; DC/DC+DC/AC双级结构的多通道储能变流器, 直流侧无并联, 可以阻止电池组间环流产生, 适用于退役动力锂电池进行成组。

(3) 利用成组后的90 kW/172.8 kW·h储能系统同分布式光伏系统在交流侧耦合, 组建光储微网系统, 实现了在并网和离网两种工况下的退役电池梯次利用。试运行结果显示: 在0.1、0.2、0.3和0.5 C等不同倍率下, 成组后的电池 C_D -OCV曲线呈现较好的一致性; 成组后的电池在0.1 C倍率下放电, 0.05 C倍率充电, 进行削峰填谷运行, 总充电量111 kW·h, 总放电量103 kW·h, 转化效率92.79%。表明按照本文所述方法筛选并成组的退役动力锂电池具备梯次利用价值, 可以在工程上进行应用。

参考文献

- [1] 韩华春, 史明明, 袁晓冬. 动力电池梯次利用研究概况[J]. 电源技术, 2019, 43(12): 2070-2073.
HAN Huachun, SHI Mingming, YUAN Xiaodong. Review on echelon utilization of power battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(12): 2070-2073.
- [2] 巨大锂电. 退役动力锂电池应遵循先梯次利用后回收利用的原则[EB/OL]. [2020-05-08]. <http://www.juda.cn/news/134798.html>.
- [3] 范茂松, 金翼, 杨凯, 等. 退役LiFePO₄电池性能测评及储能应用[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(2): 408-414.
FAN Maosong, JIN Yi, YANG Kai, et al. Testing of the performance and energy-storage applied for retired LiFePO₄ batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(2): 408-414.
- [4] 蔡铭, 陈维杰, 许俊斌, 等. 退役LiFePO₄电池梯次利用分选方法[J]. 电源技术, 2019, 43(5): 781-784.
CAI Ming, CHEN Weijie, XU Junbin, et al. Research on classification method of secondary use of retired LiFePO₄ batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(5): 781-784.
- [5] 李晓宇, 徐佳宁, 胡泽徽, 等. 磷酸铁锂电池梯次利用健康特征参数提取方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 9-16.
LI Xiaoyu, XU Jianing, HU Zehui, et al. The health parameter estimation method for LiFePO₄ battery echelon use[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 9-16.
- [6] 杨泓奕, 陈家辉, 汤志明. 基于K均值法与遗传算法的退役动力电池筛选[J]. 电源技术, 2019, 43(12): 2001-2004.
YANG Hongyi, CHEN Jiahui, TANG Zhiming. Screening decommissioned power batteries based on K-means algorithm and genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(12): 2001-2004.
- [7] 郑志坤, 赵光金, 金阳, 等. 基于库仑效率的退役锂离子电池储能梯次利用筛选[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S1): 388-395.
ZHENG Zhikun, ZHAO Guangjin, JIN Yang, et al. The reutilization screening of retired electric vehicle lithium-ion battery based on coulombic efficiency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 388-395.
- [8] 朱运征, 李志强, 王浩, 等. 集装箱式储能系统用梯次利用锂电池组的一致性管理研究[J]. 电源学报, 2018, 16(4): 80-86.
ZHU Yunzheng, LI Zhiqiang, WANG Hao, et al. Research on consistency management of echelon use of Li-ion battery pack for container-type energy storage system[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(4): 80-86.
- [9] 赵光金, 唐国鹏. 主被动均衡技术及其在电池梯次利用中的应用[J]. 电源技术, 2018, 42(7): 983-986+1075.
ZHAO Guangjin, TANG Guopeng. Active-passive hybrid equalization circuit design technology and its application in echelon use of lithium-ion power batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(7): 983-986+1075.
- [10] 黄从胜, 程志江, 杨涵棣, 等. 退役动力电池SOC估算及新型均衡电路的研究[J]. 电源技术, 2019, 43(9): 1461-1463+1487.
HUANG Congsheng, CHENG Zhijiang, YANG Handi, et al. Research on SOC estimation and new equalization circuit of retired power battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(9): 1461-1463+1487.
- [11] 张全生. 一种退役动力电池包梯次利用的筛选方法: CN 108199109A[P]. 2018-06-22.
- [12] 来小康. 关于动力电池梯次利用的一些思考[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(2): 598-602.
LAI Xiaokang. Some opinions on secondary-used of power batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(2): 598-602.
- [13] 米吉福, 范茂松, 汪浩, 等. 退役磷酸铁锂动力电池性能分析研究[J]. 电源技术, 2019, 43(2): 217-220.
MI Jifu, FAN Maosong, WANG Hao, et al. Performance study of retired power lithium iron phosphate batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(2): 217-220.
- [14] 刘道坦, 范茂松. 退役电动汽车动力电池性能测试与分析[J]. 电源技术, 2016, 40(3): 532-535.
LIU Daotan, FAN Maosong. Performance test and analysis of retired electric vehicle batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(3): 532-535.