

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210693

基于区域采样点数的锂离子电池健康状态评估^{*}林志成¹ 钟晶亮² 文贤旭² 刘思迪¹ 付在国¹ 廖强强¹

(1.上海电力大学上海市电力材料防护与新材料重点实验室 上海 200090;

2.贵州电网有限责任公司电力科学研究院 贵阳 550002)

摘要: 低采样频率下锂离子电池的健康状态(SOH)评估在工程应用中具有重要的意义。引入了区域电压(ΔV)和区域采样点数(RSP)的概念,提出了一种在概率密度函数(PDF)框架下的锂离子电池 SOH 评估方法。以实验室磷酸铁锂(LFP)电池循环老化数据为基础,建立了基于 RSP 的电池 SOH 评估模型,对比了基于 RSP 的方法和传统 PDF 法,并考察了不同采样频率和区域电压下 RSP-SOH 模型的效果。研究表明,RSP 与 SOH 呈线性正相关,RSP-SOH 模型无论是充电还是放电过程下的效果均优于传统 PDF 法。在采样频率较低时,适当的增加区域电压有助于提高 RSP-SOH 模型的评估效果。电池 RSP-SOH 模型在充电过程下对采样频率鲁棒性较好,在每五分钟一个采样点的低采样频率情况下模型的 R^2 均大于 0.98。在此基础上,采用区域采样点数法相对评估某储能电站的 220 个 LFP 电池的 SOH。当 9 个 RSP 较小的电池被替换掉后,储能电站电能的吞吐能力将提升 20.9%。

关键词: 锂离子电池;健康状态;概率密度函数;区域电压;区域采样点数;采样频率

中图分类号: TM912 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

State of health estimation of lithium-ion batteries based on regional sampling points

Lin Zhicheng¹ Zhong Jingliang² Wen Xiankui² Liu Sidi¹ Fu Zaiguo¹ Liao Qiangqiang¹

(1. Shanghai Key Laboratory of Materials Protection and Advanced Materials in Electric Power, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Guizhou Power Grid Co., Ltd., Electric Science Research Institute, Guiyang 550002, China)

Abstract: The state of health (SOH) estimation of lithium-ion batteries at a low sampling frequency has great significance in engineering applications. The concepts of regional voltage (ΔV) and regional sampling points (RSP) are introduced, and an evaluation method of lithium-ion battery SOH under the framework of probability density function (PDF) is proposed. A battery SOH evaluation model based on RSP was established based on the laboratory cycle ageing data of lithium-iron phosphate (LFP) batteries. The RSP method and the traditional PDF method were compared, and the effects of the RSP-SOH models under different sampling frequencies and regional voltages were investigated. The results show that the RSP-SOH model has a linear positive correlation with SOH, and the effect of RSP-SOH model is better than that of the traditional PDF method under both charging and discharging conditions. The evaluation effect of the RSP-SOH model can be improved by increasing the region voltage appropriately when the sampling frequency is low. The battery RSP-SOH model is robust to the sampling frequency under the charging condition, and the R^2 of the model is greater than 0.98 under the low sampling frequency of one sampling point every five minutes. On this basis, the SOH of 220 LFP batteries in an energy storage power station is relatively evaluated by using the regional sampling point method. When nine batteries with smaller RSP are replaced, the power handling capacity of the energy storage station will increase by 20.9%.

Keywords: lithium-ion battery; state of health; probability density function; regional voltage; regional sampling points; sampling frequency

0 引言

锂离子电池由于其功率和能量密度高、能量转化效率

高、循环寿命长和环境友好性而被广泛用在电动汽车及储能设备上^[1-3]。随着电池反复充放电,其可用容量也逐渐降低。电池的健康状态(state of health, SOH)是反映电池当

收稿日期:2022-07-15

^{*} 基金项目:贵州省科技支撑计划(黔科合支撑[2020]2Y064)、上海市科委项目(19DZ2271100)资助

前可用容量的特征指标。快速准确地评估电池 SOH 值对电池系统和设备的安全运行有重要的作用^[4-7]。

增量容量法 (incremental capacity analysis, ICA)^[8]、概率密度函数法 (probability density function, PDF)^[9] 和差分电压法 (differential voltage analysis, DVA)^[10] 是电池 SOH 评估的经典方法。一般通过电池管理系统将采集到的电流、电压、温度等电池数据进行分析,通过上述方法提取健康因子 (health factors, HI), 建立基于健康因子的 SOH 模型^[11-13]。上述方法一般要求电池数据具有较细的颗粒度,否则会产生较大的 SOH 评估误差。例如,对充电电压 1 min 采一个点和 5 min 采一个点后的电压数据进行 PDF 处理,得到不同电压的概率密度 (probability density, PD) 分布。当采样频率从 1 min 采一个点降低到 5 min 采一个点后,PDF 曲线上的某些峰会减弱甚至消失,这可能会使得峰值并不足以成为一个可以准确评估电池 SOH 的特征指标。

目前大多数文章主要基于低电流率和高采样频率的电池数据进行 SOH 评估的。对于在较高充放电倍率和低采样频率下运行的储能电站来说,上述方法在实际工程应用中准确评价电池 SOH 具有较大的挑战性。为了解决低采样频率下的电池 SOH 准确评估问题,本文提出了基于区域采样点数 (regional sampling points, RSP) 的方法来评估电池的 SOH,建立 RSP-SOH 评估模型,验证了不同采样频率下该方法的准确性,最后将该模型运用到某储能电站的电池 SOH 评估中。

1 方 法

传统 PDF 方法一般使用峰高作为健康因子来评估电池 SOH,基于区域采样点数的方法用电压落在特定区域电压的数量来评估电池的 SOH。在介绍该方法的步骤之前,首先定义了 PDF 曲线的几个概念。 V_{peak} 为充放电过程中 PDF 曲线上最大峰值对应的电压。区域电压 ΔV 为计算区域采样点数的电压区间。PDF 框架下 ΔV 和 RSP 的计算如下:

首先利用 MATLAB 里面 *Ksdensity* 函数对电池恒流过程中的工作电压数据进行处理,得到 PDF 的峰高 V_{peak} ,然后以 ΔV 为区域电压得到区域采样点数的起始点压 V_{start} 和终点电压 V_{end} , V_{start} 和 V_{end} 可由式(1)、(2)计算。

$$V_{start} = V_{peak} - \Delta V/2 \quad (1)$$

$$V_{end} = V_{peak} + \Delta V/2 \quad (2)$$

电压曲线数据落在 ΔV 为区域电压的概率 P 的由式(3)得到。

$$P = \frac{\int_{V_{start}}^{V_{end}} Pd dV}{\int_{V_0}^{V_1} Pd dV} \quad (3)$$

其中, Pd 为 PDF 曲线上的概率密度, V_0 和 V_1 分别为

整个 PDF 曲线上恒流段的起始电压和结束电压。

然后,区域电压范围内的区域采样点数 RSP 由式(4)给出。

$$RSP = P \times BL \quad (4)$$

式中: BL 为从 V_0 到 V_1 的充放电电压曲线中收集到的采样点数据长度数。需要注意的是,充电过程中 BL 的计数只包括恒流部分的采样点数据长度,不包括恒压部分的。

图 1 为基于区域采样点数法的 SOH 评估流程。

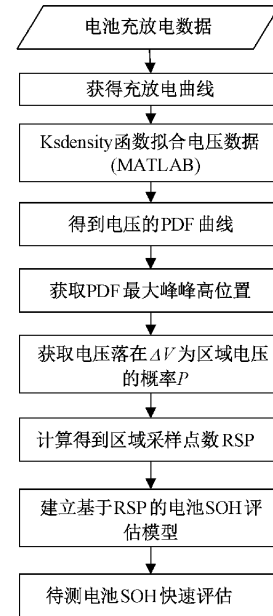


图 1 基于区域采样点数法的 SOH 评估流程

图 2 为 RSP 计算示意图,首先根据电池充电数据绘制电池充电曲线图,得到充电曲线 BL 为 10 383,如图 2(a)所示。然后将电池的充电电压数据用 MATLAB 里面 *Ksdensity* 函数处理得到 PDF 曲线,利用 Origin 软件中的自动寻峰功能,得到 PDF 曲线最大峰的峰值 V_{peak} 为 3.346 V,如图 2(b)所示。接下来选取 ΔV 为 26 mV,由式(1)~(3)计算得到电压落在 ΔV 内的概率 P (即面积 Area) 为 0.390 91,如图 2(c)所示。最后根据式(4)计算得到 RSP 为 4 058.82,如图 2(d)所示。之后建立不同 SOH 值电池的 RSP-SOH 模型,代入待测电池的 RSP 即可得到该电池的 SOH。

2 实验部分

实验对象为比亚迪磷酸铁锂 (LiFePO_4 , LFP) 电池,其充放电数据由实验室循环老化实验获得。某储能电站由 220 个该种电池串联而成,采样频率为每 5 min 一个采样点。比亚迪 LFP 电池的额定电压为 3.33 V,额定容量为 200 Ah。电池的循环老化实验使用必测电池测试仪 (MCV2-200-5,美国)。在实验开始前,提前编译电池循环老化程序,然后将测试程序传输给电池测试仪。电池测试

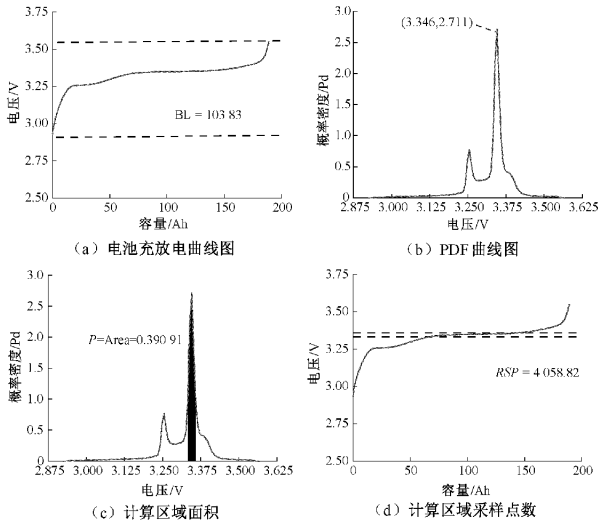


图 2 RSP 计算示意图

仅负责给 LFP 电池充放电, 电池管理系统 (battery management system, BMS) 收集并记录电池的电压、电流和温度等信息。

LFP 电池在 $1/3 C$ 下的充放电倍率下进行循环老化实验, $1/5 C$ 的充放电倍率下进行容量标定实验, 充放电电压范围 $2.7 \sim 3.65 V$ 。循环老化实验中, 在电池充放电之间设置 60 min 的静置时间。电池的循环老化实验直到 SOH 下降到约 60% 停止。每 100 次循环老化实验后, 对电池进行一次容量标定。本实验中使用的电池测试系统的采样频率为 1 Hz , 即 1 s 采集一个数据点。

3 结果与讨论

3.1 LFP 电池 SOH 建模

电池的健康状态 SOH 反映电池的荷电能力, 采用当前状态下电池的最大可用容量与新电池的额定容量的比值^[14-15]来定义电池的 SOH, SOH 可由式(5)计算:

$$SOH = Q_0 / Q_{ncw} \times 100\% \quad (5)$$

其中, Q_{ncw} 为新电池的额定容量, Q_0 为当前状态下电池的最大可用容量。

图 3 为被测 LFP 电池循环老化的结果图。图 3(a) 显示了容量标定过程中循环次数 (cycle number, CN) 与 LFP 电池 SOH 的对应关系图。经过 1 400 次循环后, LFP 电池的 SOH 值衰减到 66.48% 。在电池的循环老化过程中, 电池容量与循环次数呈现出良好的线性负相关关系, 其拟合优度 (goodness of fit, R^2) 为 0.9828 。图 3(b) 是不同循环次数下 LFP 电池在容量标定过程中的充放电曲线图。在充放电曲线的中间部分存在一个电压平台, 随着电池的老化, 充电曲线的电压平台上升, 放电曲线的电压平台下降, 说明电池的内阻增加^[16]。同时, 电池的充放电曲线越来越短, 表明电池容量越来越小。

图 4 为由图 3(b) 中所有电压数据转换后的 LFP 电池

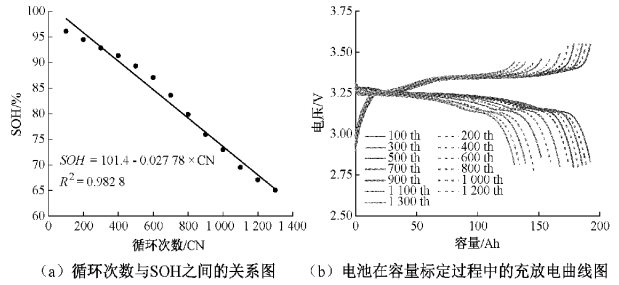


图 3 LFP 电池老化情况图

充放电电压的 PDF 图。将 PDF 曲线的充放电最大峰分别定义为 Pd-C 和 Pd-D, H_{LFP-C} 和 H_{LFP-D} 分别代表 Pd-C 和 Pd-D 的峰高值。图 5 分别为 LFP 电池的 H_{LFP-C} 和 H_{LFP-D} 与电池 SOH 的拟合关系图。结果表明, 充电过程中, H_{LFP-C} 与电池的 SOH 呈线性正相关, H_{LFP-C} 与电池的 SOH 的 R^2 为 0.9417 。放电过程中, H_{LFP-D} 与电池的 SOH 的 R^2 仅为 0.3493 。可见, 在放电过程中, 用 H_{LFP-D} 作为 HI 来评估电池的 SOH 的效果不是很好。

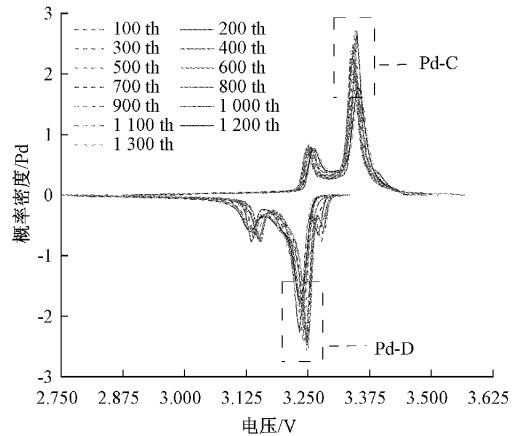


图 4 LFP 电池循环老化的结果图

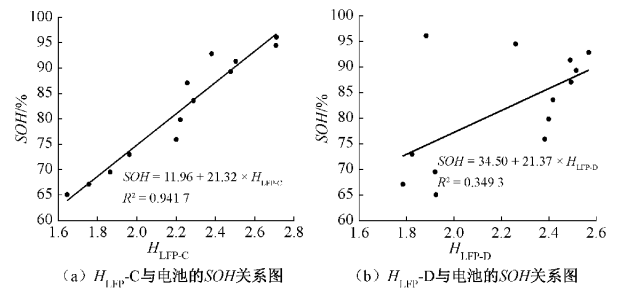


图 5 LFP 电池的 PDF 曲线峰值与电池 SOH 拟合关系图

为了探讨不同区域电压下电池的 SOH 与 RSP 之间的数学关系, 将区域电压分别设置为 $20, 40, 80$ 和 160 mV , 采样频率设置为 1 Hz , 即 1 s 采一个点。图 6 为 RSP 和 LFP 电池的 SOH 关系图。其中, 图 6(a)~(d) 分别为充电条件下区域电压 $20, 40, 80$ 和 160 mV 时 RSP 和 LFP 电池的 SOH 关系图, 图 6(e)~(h) 分别为放电条件下区域电

压 20、40、80 和 160 mV 时 RSP 和 LFP 电池的 SOH 关系图。由图 6 可以看出,SOH 与区域采样点数 RSP 呈线性正相关。无论是在充电还是放电过程下,RSP-SOH 模型的 R^2 都很高,尤其在充电过程下,模型的 R^2 均在 0.99 以

上。而在放电过程下, R^2 随着区域电压的增加而显著增加,当区域电压大于 80 mV 时,RSP-SOH 模型的 R^2 都大于 0.97,表明区域采样点数作为 HI 评估电池 SOH 具有很好的效果。

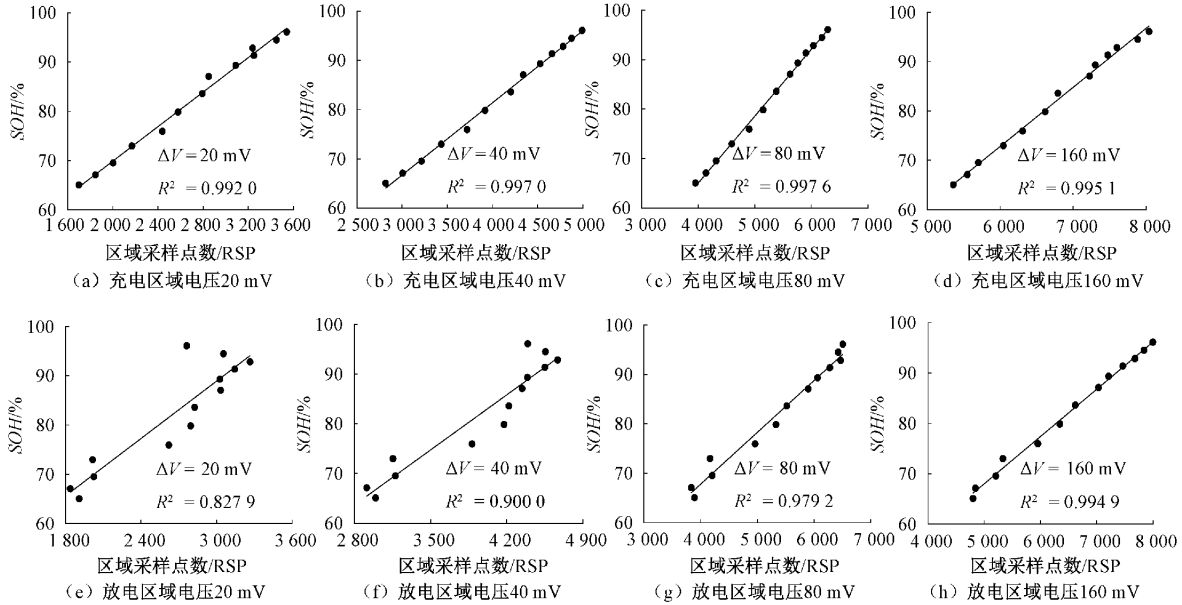


图 6 不同区域电压下 RSP 和 LFP 电池的 SOH 关系图

采样频率发生改变时,电池电压数据转换而来的 PDF 曲线也会随之发生变化。图 7 为不同采样频率下 PDF 的 H_{LFP-C} 和 H_{LFP-D} 和 LFP 电池的 SOH 关系图。其中,采样频率分别设置为 1 min 采一个点、2 min 采一个点、5 min 采一个点。充电过程以 H_{LFP-C} 作为 HI 的 SOH 模型的 R^2

分别为 0.959 8、0.964 7 和 0.932 9,如图 7(a)~(c)所示。放电过程以 H_{LFP-D} 作为 HI 的 R^2 分别为 0.625 4、0.637 9 和 0.653 7,如图 7(d)~(f)所示。可见,无论采样频率高低,在充电过程下以 H_{LFP-C} 作为 HI 的 SOH 模型的拟合度都比较高,而放电过程下的比较低。

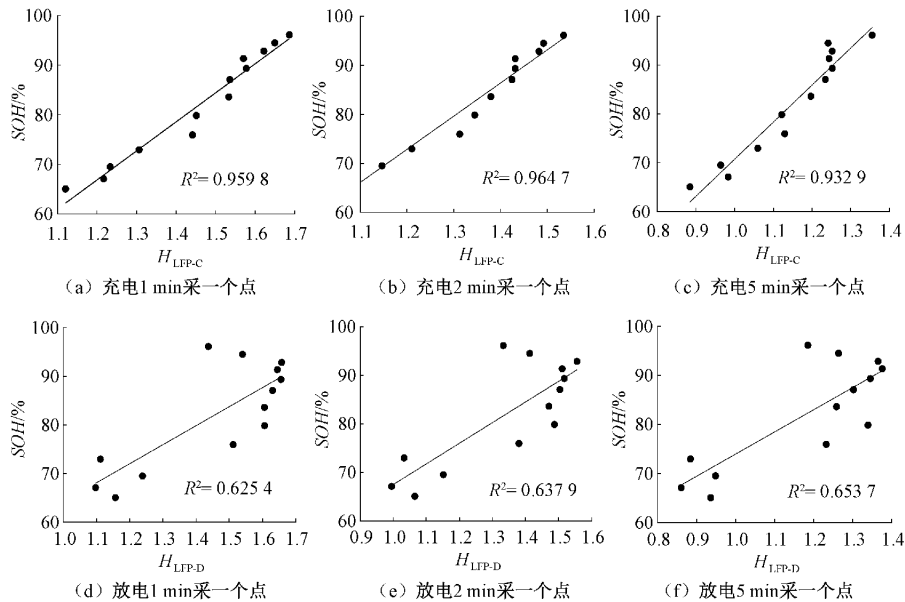


图 7 不同采样频率下的 H_{LFP-C} 和 H_{LFP-D} 和 LFP 电池的 SOH 关系图

图 8 为 5 min 采一个点时不同区域电压下 LFP 电池的 RSP 与 SOH 关系图。其中,区域容量分别设置为 20、

40、80 和 160 mV。充电条件下区域电压 20、40、80 和 160 mV 时 RSP 和 LFP 电池的 SOH 关系图分别如

图 8(a)~(d) 所示, 放电条件下区域电压 20、40、80 和 160 mV 时 RSP 和 LFP 电池的 SOH 关系图分别如图 8(e)~(h) 所示。结果表明, 无论充放电, 采样频率降低到 5 min 采一个点时对 RSP-SOH 模型的 R^2 影响不大, 而区域电压的增加能有效地提高放电过程下 RSP-SOH 模型

的 R^2 。当区域电压设置为 160 mV 时, 模型对采样频率具有很强的鲁棒性, 放电过程的拟合度 R^2 均大于 0.99。与采用以 H_{LFP-C} 和 H_{LFP-D} 作为 HI 的 SOH 评估模型对比, 基于区域采样点数的方法拟合度 R^2 更高、对采样频率不敏感, 且在充放电过程下均表现良好的拟合效果。

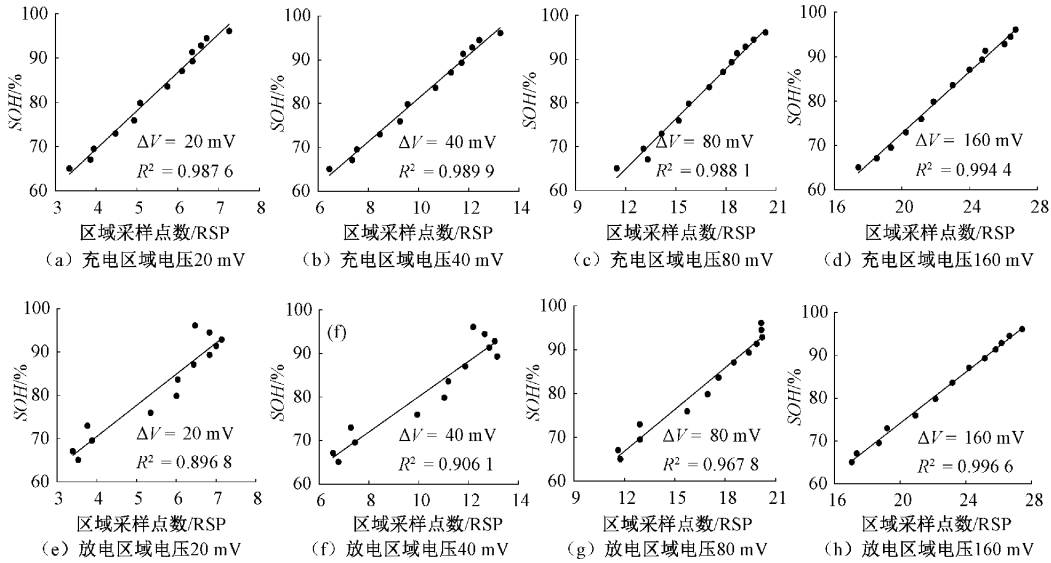


图 8 5 分钟采一个点时不同区域电压下 RSP 和 LFP 电池的 SOH 关系图

3.2 储能电站电池 SOH 在线评估

储能电站由很多电池串并联而成, 低 SOH 的电池将降低储能电站的电能吞吐能力。由于储能电站 BMS 采集的数据传输与存储能力受限, BMS 设置的采样频率往往比较低, 采用传统的 ICA、DVA、PDF 方法很难准确评估储能电站的电池 SOH 值。

图 9 为某储能电站的电池某一天的充放电电流随时间变化图, 其中放电电流规定为正, 充电电流为负。从图 9 可以看出, 在该储能电站的运行过程中, 电池的放电电流是随着负荷的需求而发生变化的, 而充电电流较为恒定, 因此采用充电电压数据来评估电池的 SOH。由于储能电站电池在 22:00~02:00 之间几乎是恒流充电的, 所以用这段时间储能电站的电池电压数据来评估电池的 SOH。

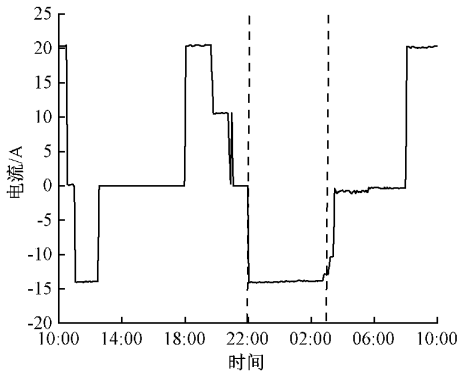


图 9 某储能电站电池某一天的充放电电流变化图

将储能电站的 220 个电池分别编号为 1#、2#、...、220#, 图 10 为储能电站的前 10 个编号的电池在恒流充电时电压随时间变化图和 PDF 图。图 10(a) 为电压随时间变化图。从图 10(a) 中可以看出, 电池的充电电压曲线差别较大, 说明这些电池之间不一致明显。图 10(b) 是由图 10(a) 得到的 PDF 图, 采用区域采样点数法求出这 10 个电池的 RSP, 区域电压取值 80 mV。其它电池的 RSP 值采用同种方法获得。

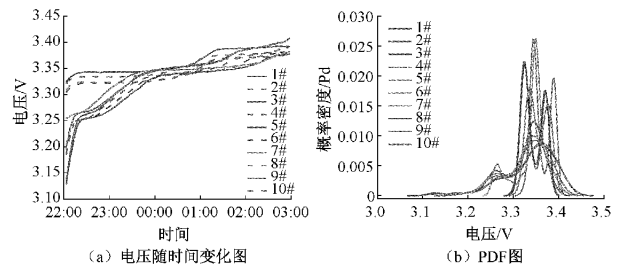


图 10 储能电站的前 10 个编号的电池在恒流充电时电压随时间变化图和 PDF 图

图 11 为储能电站 220 个电池的 RSP 图。由实验室数据建立的比亚迪 LFP 电池的 SOH 评估模型可知, 区域采样点数 RSP 与电池的 SOH 呈线性正相关, RSP 越大, 则表明电池的 SOH 越高。将储能电站的 220 个电池按照 RSP 的大小分为 3 个区域, 其中, I 区域 ($RSP > 45$)、II 区域 ($35 < RSP < 45$)、III 区域 ($RSP < 35$)。从图 11 中可以看出, 第 I、II、III 区域的电池数量分别为 6、205 和 9。超过

90% 电池集中在 I、II 区域,表明在储能电站中,大部分电池的 SOH 都比较好。有 9 个电池区域采样点数 $RSP < 35$,位于第 III 区域,说明这几个电池的 SOH 相对较低。

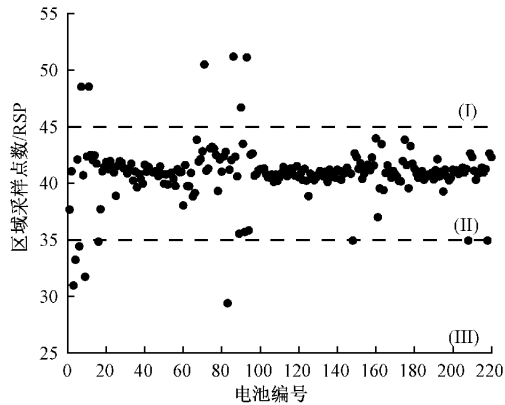


图 11 储能电站 220 个电池的 RSP 图

由于木桶效应,储能电站电能的吞吐能力取决于 SOH 最小的串联电池^[17]。替换掉 SOH 较低的电池对储能电站电能的吞吐能力有很大提升。由于电池的 RSP 与 SOH 呈线性正相关,储能电站电能的吞吐能力提升的比例 I 可由式(6)计算:

$$I = \frac{SOH_{aft} - SOH_{pre}}{SOH_{pre}} \times 100\% = \frac{RSP_{aft} - RSP_{pre}}{RSP_{pre}} \times 100\% \quad (6)$$

其中, SOH_{pre} 、 SOH_{aft} 分别为储能电站电池替换前、后最小的 SOH 值, RSP_{pre} 、 RSP_{aft} 分别为储能电站电池替换前、后最小的 RSP 值。

如果将第 III 区域的这 9 个 RSP 比较小的电池替换掉,那么储能电站电池替换前 RSP_{pre} 为 29.40,替换后 RSP_{aft} 为 35.55。根据式(6)计算可知,储能电站的电能吞吐能力将提升 20.9%。

4 结 论

在 1/3 C(66.7 A)的倍率下对比亚迪 LFP 电池进行循环老化实验,采用充放电电压数据,以 PDF 法为框架建立了 RSP-SOH 的电池 SOH 评估模型。结论如下:

用 PDF 曲线上的 H_{LFP-C} 和 H_{LFP-D} 作为健康因子(HI)评估电池的 SOH 时,在充电过程下拟合度 R^2 达到 0.941 7,在放电过程下的 R^2 为 0.349 3,说明在放电过程下,用 H_{LFP-D} 作为 HI 来评估电池的 SOH 的效果不是很好。

在 PDF 法的框架下引入 ΔV 和 RSP 的概念,在不同区域电压下建立了 RSP-SOH 的电池 SOH 评估模型,RSP 与电池的 SOH 呈线性正相关。当区域电压大于 80 mV 时,RSP-SOH 模型的 R^2 都大于 0.97。

当采样频率从每 1 s 一个采样点逐渐提高到每 1、2、5 min 一个采样点时,当区域电压在 80 mV 及以上时,在充放电过程下 RSP-SOH 评估模型的拟合度均在 0.96 以

上。作为电池 SOH 评估模型的 HI 来说,RSP 要优于 H_{LFP-D} 。

根据实验室建立的 RSP-SOH 模型,采用区域采样点数法相对评估某储能电站的 220 个 LFP 电池的 SOH。当 9 个 RSP 较小的电池被替换掉后,储能电站电能的吞吐能力将提升 20.9%。研究结果对储能电站运行维护有重要的参考价值。

参考文献

- [1] 但强. 中小锂电池组切换式均衡方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(11): 82-87.
- [2] 魏业文, 解园琳, 李梅, 等. 基于多指标最优权值融合的锂电池 SOH 估计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(15): 23-29.
- [3] 徐超. 车载动力锂电池 SOH 估计研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2021.
- [4] 王义, 刘欣, 高德欣. 基于 BiLSTM 神经网络的锂电池 SOH 估计与 RUL 预测[J]. 电子测量技术, 2021, 44(20): 1-5.
- [5] ZHANG Y, LIU Y, WANG J, et al. State-of-health estimation for lithium-ion batteries by combining model-based incremental capacity analysis with support vector regression [J]. Energy, 2022, 239: 121986.
- [6] LUO F, HUANG H, NI L, et al. Rapid prediction of the state of health of retired power batteries based on electrochemical impedance spectroscopy[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 41: 102866.
- [7] 高昕, 韩嵩. 基于分数阶模型的锂离子电池 SOC 与 SOH 协同估计[J]. 电源技术, 2021, 45(9): 1140-1143, 1208.
- [8] 刘大同, 宋宁晨, 武巍, 等. 锂离子电池组健康状态估计综述[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 1-18.
- [9] FENG X, LI J, OUYANG M, et al. Using probability density function to evaluate the state of health of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2013, 232: 209-218.
- [10] ZHANG S, GUO X, DOU X, et al. A rapid online calculation method for state of health of lithium-ion battery based on coulomb counting method and differential voltage analysis [J]. Journal of Power Sources, 2020, 479: 228740.
- [11] 李练兵, 李思佳, 李洁, 等. 基于差分电压和 Elman 神经网络的锂离子电池 RUL 预测方法[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(6): 2373-2384.
- [12] 顾正建, 秦志光, 杨智皋, 等. 基于容量增量分析的退役 LiFePO₄ 电池分选方法[J]. 电源技术, 2021, 45(12): 1566-1568, 1659.
- [13] HE Z, SHEN X, SUN Y, et al. State-of-health

- estimation based on real data of electric vehicles concerning user behavior [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 41: 102867.
- [14] 杨胜杰, 罗冰洋, 王菁, 等. 基于容量增量曲线峰值区间特征参数的锂离子电池健康状态估算[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(11): 2277-2287.
- [15] 骆凡, 黄海宏, 王海欣. 基于电化学阻抗谱的退役动力电池荷电状态和健康状态快速预测[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(9): 172-180.
- [16] HUANG S, LIU C, SUN H, et al. State of health estimation of lithium-ion batteries based on the regional frequency [J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 518: 230773.
- [17] ZHANG Q, LI X, ZHOU C, et al. State-of-health estimation of batteries in an energy storage system based on the actual operating parameters[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 506: 230162.

作者简介

林志成, 硕士研究生, 主要研究方向为退役电池健康状态评估。

E-mail: 1625214700@qq.com

廖强强(通信作者), 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为动力电池回收与梯次利用。

E-mail: 13371895959@163.com