

风-光储能系统锂离子电池 SOC 校准优化方法

黄庆祥^{1,2}, 郭玲^{1,2}, 刘修童^{1,2}, 秦小安^{1,2}

(1. 武汉供电设计院有限公司, 湖北 武汉 430030;

2. 湖北正源电力集团有限公司设计分公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 使用安时积分法估算电池荷电状态(SOC)在工业上已有广泛应用,但对于风光互补发电系统来说,使用开路电压(OCV)校准安时积分法的累积误差并不切实际,因为 OCV 法需要电池静置数小时。针对此问题,提出一种新的校准方法,该方法与 OCV 法类似,但校准条件只需要电池电流恒定或小范围波动维持 4 min,更适用于校准风-光储能系统中使用安时积分法存在的误差累积问题。使用 4 串 6 并的软包钴酸锂电池进行试验测试,在 3.9、3.6、3.2 V 三个不同电压平台中,所提出的策略与实际 OCV 误差均小于 10 mV,换算成 SOC 均小于 1%,证明了本文所提出策略的可行性。

关键词: 锂离子电池; 开路电压; 电池荷电状态估算; 安时积分

中图分类号: TM912 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)03-0095-05

doi: 10.12177/emca.2023.006

Optimization Method of SOC Calibration for Lithium-Ion Battery in Wind-Solar Energy Storage System

HUANG Qingxiang^{1,2}, GUO Ling^{1,2}, LIU Xiutong^{1,2}, QIN Xiao'an^{1,2}

(1. Wuhan Power Supply Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430030, China;

2. Design Branch, Hubei Zhengyuan Electric Power Group Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: The ampere-hour integral method in industry to estimate the state of charge (SOC) of battery. However, it is impractical to use open circuit voltage (OCV) to calibrate the cumulative error of ampere-hour integral method for wind-solar energy storage systems. Because the OCV method requires the battery to be stationary for several hours. To address this problem, a new calibration method is proposed, which is similar to the OCV method, but its calibration conditions only require the current of battery constant or maintain 4 min fluctuation in a small range, which is more suitable for calibrating the error accumulation problem in wind-solar energy storage systems using the ampere-hour integral method. 4S6P soft pack lithium-ion batteries is used for experimental testings in 3.9 V, 3.6 V and 3.2 V about three different voltage platforms, the proposed strategy and the actual OCV error were less than 10 mV, and the conversion to SOC is less than 1%, which prove the feasibility of the proposed strategy.

Key words: lithium-ion battery; open circuit voltage (OCV); state of charge (SOC) estimation; ampere-hour integral

0 引言

风力及光伏发电因具有清洁无污染等优点而

被应用广泛,但其输出功率受环境影响较大,所以通常会使用锂离子电池储能来平抑其功率波动^[1-3]。锂离子电池荷电状态(SOC)表征电池当

收稿日期: 2022-12-08; 收到修改稿日期: 2023-01-04

作者简介: 黄庆祥(1972—),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网规划设计及新兴业务。

郭玲(1974—),女,本科,高级工程师,研究方向为配电及新兴业务。

刘修童(1986—),男,本科,工程师,研究方向为配电及新兴业务。

前状态下剩余可用容量,是电池安全可靠运行的重要参数之一。

电池 SOC 无法直接测量,只能通过电压、电流、温度等参数间接估算,目前估算电池 SOC 的方法有很多,常见的有安时积分法、开路电压(OCV)校准法及卡尔曼滤波算法衍生的其他方法,比如扩展卡尔曼滤波(EKF),无迹卡尔曼滤波(UKF),自适应扩展卡尔曼滤波(AEKF),神经网络法等^[4-6]。安时积分法因具有简单、可靠等优点被广泛应用于各种场合,但安时积分法是开环的^[7],而电池 SOC 与 OCV 具有特定函数关系,故工程上往往将安时积分法与 OCV 校准法联合使用^[8],但使用 OCV 校准法的局限在于测量电池 OCV 时需要使电池静置数小时。EKF、UKF、AEKF、神经网络等方法具有比安时积分法更高的精度,但在可靠性以及简便性方面没有安时积分法高^[9-10]。

风-光互补发电中,白天光伏发电占主要地位,夜晚风力发电占主要地位,并且负载随时都有可能需要电池组供电,整个系统在一天中很难实现长达数小时的时间静置,因此 OCV 校准法可能无法达到预期效果。同时,对于风-光发电系统来说,电流采样的方式一般是霍尔传感器或精密电阻分流,这些方式难免会存在温漂以及电流零点漂移的问题,同时风-光发电系统工作环境较为恶劣,这就导致其电流采样精度会存在很大问题,长久运行可能会使得安时积分法误差累积越来越大,如果不加以校准,可能会影响系统安全可靠运行。

针对利用 OCV 校准电池 SOC 的问题,目前研究集中于两方面,通过等效电路模型估算电池 OCV 和通过对静态下的 SOC-OCV 曲线进行变换,获得当前状态下的 SOC-OCV 曲线。前者通常建立电池等效电路模型,计算电池极化电压、欧姆电压,利用电池端电压计算电池 OCV。该方法类似于 KF 及拓展算法的 SOC 估算,文献[11]利用上述方法获得电池 OCV,并通过其偏离测量真值的程度进行进一步修正。文献[12]建立电池自适应模型,利用递归最小二乘法估算电池 OCV。文献[13]则是利用 H ∞ 滤波获得电池 OCV。采用后者的方法,如文献[14]利用时空动态扭曲平移,旋转 SOC-OCV 曲线,获得当前充放电电流及时间状态下的 OCV 与 SOC 关系。上述方法都有

其优势,但对于该系统,更需要关注方法的简单性及高可靠性,故上述方法并不适用于风-光储能系统。

基于上述问题,本文提出一种适用于风-光储能系统容量校准的方法,以解决安时积分法应用于该系统时存在的校准难问题,同时搭建系统软硬件平台,通过试验验证所提出方法的可行性。

1 策略原理分析

图 1 为电池一阶 RC 模型,其中 OCV 是电池开路电压,与电池的 SOC 存在非线性关系, U_k 是 k 时刻电池端电压, C_p 和 R_p 是电池极化电容和极化电阻, R_k 是电池的欧姆内阻,会随着电池 SOC 的变化而变化, i_k 是 k 时刻电池的充放电电流,规定电池充电时为正,在放电时则为负。

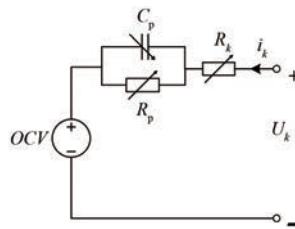


图 1 一阶 RC 模型

由图 1 可列出:

$$U_k = OCV(SOC_k) + R_k i_k + u_{p,k} \quad (1)$$

$$u_{p,k} = u_{p,k-1} - \frac{1}{\tau} u_{p,k-1} + R_p i_k - 1(1 - e^{-\frac{T}{\tau}}) \quad (2)$$

式中: u_p 为电池极化电压,也就是 C_p 以及 R_p 上的电压; T 为采样周期; τ 为电池极化时间常数。

如果电池电流为恒定的,那么式(2)即可以写为

$$u_{p,k} = u_{p,0} e^{-\frac{kT}{\tau}} + R_p i(1 - e^{-\frac{kT}{\tau}}) \quad (3)$$

当 kT 趋于 $+\infty$ 时,式(3)可以写为

$$u_{p,k} = R_p i \quad (4)$$

从式(4)中可以看到,若电池处于恒流状态(包括电流为 0),那么经过足够长的时间后,极化电容上几乎没有电流,极化电容即可以视为开路,如图 2 所示。

由图 2,式(1)就可以改写为

$$U_k = OCV(SOC_k) + (R_k + R_p) i_k \quad (5)$$

事实上,若 $KT=4\tau$,则式(3)即可以写为

$$u_{p,k} = 0.02 \times u_{p,0} + 0.98 \times R_p i_k \quad (6)$$

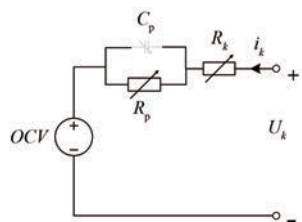


图2 恒流状态电池等效电路

一般情况下,电池的初始极化电压 $u_{p,0}$ 并不大,这也就意味着,当 $kT=4\tau$ 时,式(6)与式(4)可视为等效。式(5)中, R_k+R_p 即为电池的直流内阻 R_d ,式(5)即可简化为

$$U_k = OCV(SOC_k) + (R_{dk})i_k \quad (7)$$

式中: R_{dk} 为 k 时刻电池直流内阻。

电池的直流内阻是电池出厂前必须筛选配对的重要参数,所以该参数可以认为是已知的。可以看到,若在一段时间内电池电流处于恒定状态,那么可以根据电压采样芯片所获得的电池端电压 U_k ,电流传感器所获得的电流 i_k 以及在电池出厂前已被写入 EEPROM 的电池直流内阻 R_d ,即可估算出电池的开路电压,基于电池 SOC 与开路电压 OCV 的关系即可以获得当前状态下电池 SOC。

安时积分法是目前工程上估算电池 SOC 应用得最多的方法,其原理如下所示:

$$SOC_T = SOC_0 + \frac{1}{C} \int_0^T \eta I dt \quad (8)$$

式中: SOC_T 为 T 时刻所估算出的 SOC; SOC_0 为初始 SOC; C 为电池当前状态下最大容量; η 为电池充放电效率。

从式(8)中可以看到,安时积分法非常简单且可靠,执行起来几乎不需要占用微处理器(MCU)资源,其 SOC 估算误差与电流采样误差成正比。从式(8)中也可以看出安时积分法在原理上是开环的,这也就意味着,如果不加以校准,安时积分法误差将会累积得非常大。

从上述分析中可以看到,若电池组在恒流状态下持续 4τ 时(一般不会超过 4 min),那么就可以认为电池已进入稳态,即可以通过式(7)间接估算其 OCV,从而对其 SOC 进行校准。

2 性能分析

本文所提出策略与通用策略在校准条件上的

对比如图 3 所示。

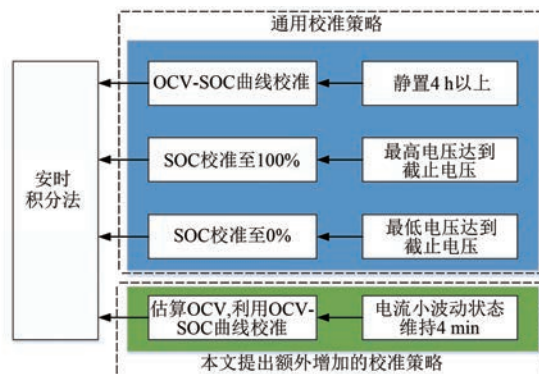


图3 两种策略性能比较

从图3中可以看到,相较于通用的校准策略,本文在此基础上额外增加了电流小波动状态下的校准。从第1节的分析中可以看到,式(7)成立的条件是电流为恒定值,但在实际应用过程中,这几乎不切实际,虽然间接允许电流有小幅波动会增加部分误差,但却可以大大提高该策略的实用性。

从图3中可以看到,通用的校准策略对校准条件较为严格,第一条策略需要电池静置很久,期间既不能充电也不能放电,对于白天有光伏发电,夜晚有风力发电,一天中可能随时有负载需要提供电量的风-光发电储能系统来说,这种条件非常严苛。同时,第二和第三条策略需要电池满充或完全放空,该要求在很多场合也较难达到。由于安时积分法的上述特性,故通用的校准策略并不能很好地应用于风-光储能系统。而本文所提出的策略在此基础上增加电流小幅波动校准,在储能系统运行过程中,电池电流小幅波动维持 4 min 并不难。当电池恒流放电、恒流充电或短暂静置时,都可以利用该策略间接进行校准,这就较好地避免了风-光储能系统中应用安时积分法存在较严重的误差累积问题。本文所提出策略的运行流程如图4所示。可以看到,本文所提出的策略实施起来非常简单,对于 MCU 来说几乎不需要占用资源,这对于风-光互补发电储能系统来说是非常重要的。

3 试验结果分析

本文基于飞思卡尔 MC9S12XET256 芯片进行平台搭建以及试验验证,EEPROM 使用常用的 24AA1025 用来存储电池 SOC 以及直流电阻等参

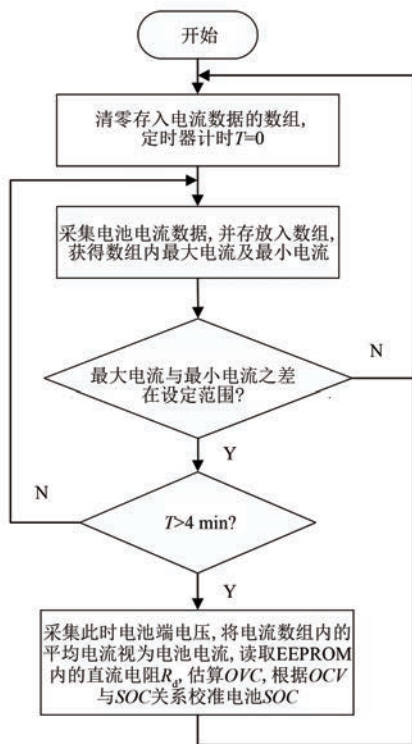


图4 所提策略运行流程图

数, 电池电压采样芯片使用 LTC6803, 该芯片性能强大, 电压采样误差较小。MCU 通过串行外设接口(SPI)通信方式获得 LTC6803 采样的电池电压, 电流采样使用霍尔传感器方案, 考虑到充电电流与放电电流范围相差较大, 使用大量程和小量程两个方案。通信方面, 使用控制器局域网络(CAN)通信方式, 将电压、电流、SOC 等相关信息上报。软件设计方面, 正常情况下使用安时积分法估算电池 SOC, 即采集电池电流, 通过定时器计算当前电池剩余容量变化值, 基于上一时刻剩余容量计算当前时刻剩余容量, 然后计算当前时刻 SOC。为提高上报 SOC 精度, 使用两字节表示电池 SOC, 其分辨率为 0.01%; 当 SOC 变化 0.5% 或为 100% 或 0% 时, 往 EEPROM 中写入当前时刻的剩余电量。在校准流程方面, 参考图 4, 其中最大与最小电流之差的阈值为 2 A, 由于定时器每 100 ms 进行一次数据采集, 故 $T > 4 \text{ min}$ 用数组元素个数 > 2400 进行判断。

本文使用软包钴酸锂电池进行测试, 电池组连接方式为 4 串 6 并, 通过直流内阻仪测得其放电正极至放电负极的直流内阻约为 $12 \text{ m}\Omega$ 。在电池组电压区间内取 3.9、3.6、3.2 V 三个不同平台

进行测试, 恒流放电约 4 min 后的电压变化情况如图 5~图 7 所示。

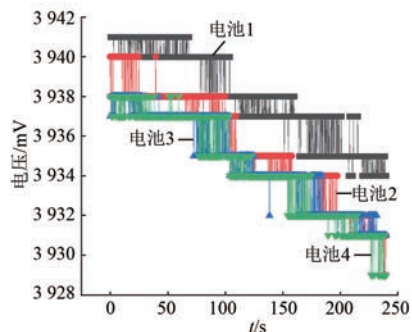


图5 测试1

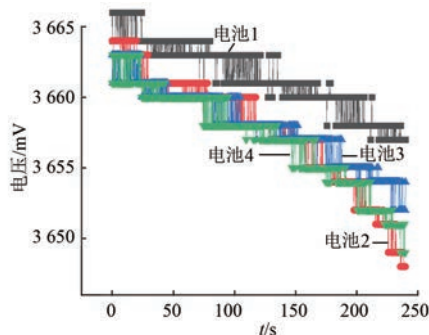


图6 测试2

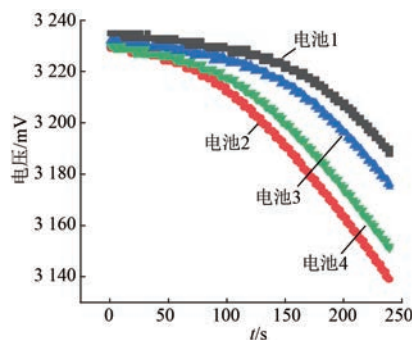


图7 测试3

图5~图7中, 电池的放电电流约为 10 A, 可以看到, 在电池处于不同电压平台时, 4 min 内的压降明显不同, 特别是图 7, 在电池 SOC 末端, 其电压下降特别快。

电池 OCV 与 SOC 的关系如图 8 所示。

由于该曲线不容易拟合, 故使用分段拟合策略获得电池 OCV 与 SOC 关系, 即当电池电压低于 3 800 mV 时是一种对于关系, 而当电池电压高于 3 800 mV 时是另一种关系。图 5~图 7 中, 恒流放电 4 min 后电池末端平均化电压。估算的平

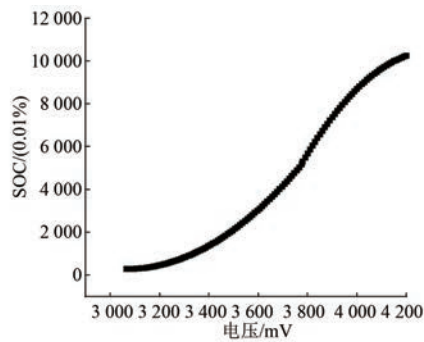


图 8 电压-SOC 曲线图

均 OCV 等参数如表 1 所示。

表 1 性能分析测试参数

项目	测试 1	测试 2	测试 3
末端平均电压/mV	3 931	3 652	3 164
估算平均 OCV/mV	4 051	3 772	3 284
真实平均 OCV/mV	4 059	3 778	3 296
OCV 估算误差/mV	8	6	12
估算 SOC/%	92.29	51.10	7.50
真实 SOC/%	93.04	51.92	8.02
SOC 误差/%	0.75	0.82	0.52

从表 1 中可以看到,本文所提出的策略估算出的 OCV 比真实值偏低,这是因为本文所提出的策略将电池 4 min 时的欧姆压降以及极化压降默认为是 4 h 后的,因此带来一定的误差。此外,电池直流内阻与电池 SOC 等因素有关,这在计算 OCV 过程中也会存在一定误差。据文献[14]所提出的方法得,常温下均方根误差为 0.55%,虽然本文所提出的策略误差略大,但该方法非常简单且易于实施,并且该方法下估算出的 SOC 误差基本控制在 1% 以内。通常情况下,电池管理系统(BMS)通过 CAN 上报电池 SOC 时,SOC 只会占用一个字节,所以其最大分辨率为 0.4%,但通常以 1% 的分辨率上传,故即使本文所提出的策略估算出的 SOC 仍存在部分误差,但误差不会过多影响电池组判断。

综上所述,据本文所提出的策略所估算出的电池 SOC,在精度方面的误差是可以容忍的。因此,在风-光储能系统中,使用该策略校准安时积分法估算电池 SOC 存在的误差是可行的,且效果较为理想。

4 结 语

由于风-光储能系统的特点,使得电池组很难使用 OCV 法校准电池 SOC,但安时积分法存在的误差累积问题在此系统上会显得更为严重,故宽松的校准策略非常重要。本文所提出的策略只需要电池组电流小幅波动维持 4 min 即可,这在实际应用中非常常见,并且所提出的策略估算出的电池 SOC 误差在可接受范围内,故使用本文所提出的策略校准安时积分法是可行的。

【参考文献】

[1] 李基有,刘光壮. 基于 PLC 控制的风光互补发电系统设计[J]. 自动化与仪器仪表,2022(3):101.

[2] 申建建,王月,程春田,等. 水风光多能互补发电调度问题研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022,42(11):3871.

[3] ANGADI S, YARAGATTI U R, SURESH Y, et al. Comprehensive review on solar, wind and hybrid wind-PV water pumping systems-an electrical engineering perspective [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2021, 6(1): 1.

[4] 杜洪刚,刘广忱,李阳,等. 基于 DSP 和 AUKF 的锂离子电池 SOC 估计[J]. 电源技术,2022,46(9):1009.

[5] 李泓沛,刘桂雄,邓威. 基于 LSTM+UKF 融合的动力锂电池 SOC 估算方法[J]. 中国测试,2022,48(8):22.

[6] MENG J, RICCO M, LUO G, et al. An overview and comparison of online implementable SOC estimation methods for lithium-ion battery[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 54(2): 1583.

[7] 马青云,王顺利,余鹏,等. 基于自适应 FFRLS 和改进 CEKF 锂电池 SOC 的估算[J]. 电源技术,2022, 46(4):395.

[8] ZHOU W, ZHENG Y, PAN Z, et al. Review on the battery model and SOC estimation method [J]. Processes, 2021, 9(9): 1685.

[9] CUI Z, WANG L, LI Q, et al. A comprehensive review on the state of charge estimation for lithium - ion battery based on neural network[J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(5): 5423.

[10] 李军,李虎林. 电动汽车锂离子电池荷电状态估算方法综述[J]. 科学技术与工程,2022,22(06): 2147.

(下转第 107 页)