

融合算法在蓄电池 SOC 估算中的研究综述

王晓辉¹, 郑超², 张思义¹, 戴明¹, 肖伟¹, 陈醒¹

(1. 国网江苏省电力有限公司徐州供电公司, 江苏 徐州 221000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 蓄电池的荷电状态(SOC)是电池管理系统中的重要参数之一,准确估算电池SOC对生产运行具有重要意义。首先,阐释了SOC的定义;其次,分析了传统单一SOC估算法的不足;然后,论述了近几年蓄电池SOC融合估算方法如神经网络、卡尔曼滤波法和综合法的研究进展,并分析了各种方法存在的优缺点;最后,给出总结与展望。提出充分利用数据挖掘和深度学习技术,将BMS记录的历史数据用于蓄电池SOC的估算,有助于提高计算精度和应用范围。

关键词: 蓄电池;荷电状态(SOC);融合算法

中图分类号: TM912 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)01-0043-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20210110

Summary of Fusing Algorithm Research in Estimation for State of Charge of Battery

Wang Xiaohui¹, Zheng Chao², Zhang Siyi¹, Dai Ming¹, Xiao Wei¹, Chen Xing¹

(1. State Grid Xuzhou Electric Power Supply Company, Xuzhou 221000, Jiangsu, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The state of charge (SOC) of battery is one of the important parameters in battery management system (BMS). Accurate estimation of SOC is of great significance for production and operation. Firstly, the definition of SOC is explained. Secondly, the shortcomings of traditional single SOC estimation method are analyzed, and then, the research progress of SOC fusion estimation methods for battery in recent years, including neural network, Kalman filter and synthesis method, is discussed, and the advantages and disadvantages of each method are analyzed. Finally, the summary and prospect are given. It is proposed to make full use of data mining and deep learning technology and use the historical data recorded by BMS to estimate the SOC of battery, which is helpful to improve the calculation accuracy and application range.

Key words: battery; state of charge (SOC); fusion algorithm

0 引言

蓄电池是制造业中一种使用广泛的储能设备,具有供电可靠、电压稳定等特点。此外,蓄电池是混合动力汽车和电动车辆的核心组成部分,作为系统的间接或直接电源,保证其安全可靠的运行对系统的安全至关重要^[1-2]。但由于受蓄电池固有特性的影响,实际场景下仍存在一些薄弱环节。突出表现在以下3点:现有方式下蓄电池组很难达到预期寿

命;运行维护工作量较大;现阶段实时监测技术落后、手段单一。电池管理系统(battery management system, BMS)俗称电池管家,是电池与用户之间的纽带,具有准确监测、高效评估、精确管理的特点。BMS采集电池系统的实时运行数据,并对其状态进行评估,主要包括:荷电状态(state of charge, SOC)、功率边界、健康状态和故障状态,其中荷电状态估计是BMS研究的核心和难点^[3-5]。近年来,国内外学者先后对SOC的估算方法进行了大量的研究^[6-55],也取得一些成果,但是在工程应用方面仍存在问题。SOC是电池使用过程中最重要的参数之一,会

受到电池内部电化学反应、外部环境条件等因素的影响,具体包括充放电倍率、环境温度、电池内阻及老化等。目前蓄电池 SOC 估算方法主要有开路电压法、安时积分法、神经网络法、卡尔曼滤波法以及综合法,下面对上述方法进行详细分析,并给出总结与展望。

1 电池 SOC 的定义

SOC 指电池的荷电状态,是一个无量纲的数值量,可理解为储存在能量系统中的有用电荷和全部额定电荷容量的比值,即剩余容量/额定容量。

$$S(t) = \frac{E(t)}{E_{\text{nom}}} \quad (1)$$

式中: $S(t)$ 为荷电状态值; $E(t)$ 为剩余容量(residual capacity); E_{nom} 为额定容量(total capacity)。

2 单一 SOC 估算方法的不足

相关研究指出,蓄电池的电动势 $U(t)$ 与其荷电状态密切相关^[9-13],函数关系如式(2)所示。

$$S(t) = F(U(t)) \quad (2)$$

经典的 SOC 估算方法采用安时积分法^[14-17],也叫电流积分法或库仑计数法,通过对电池充放电过程中的电流进行积分运算,进而估算电池的 SOC 为

$$S(t) \approx S_0 - \frac{\int_0^t \eta(t) I(t) dt}{E_{\text{nom}}} \quad (3)$$

式中: S_0 为初始荷电状态; $\eta(t)$ 为放电倍率(放电时, $\eta(t) \approx 1$; 充电时, $\eta(t) \approx 0.98 \sim 0.99$)。

开路电压法操作便捷,但需要电池较长时间处于静置状态,所需的测量条件特殊。

安时积分法的误差来源有:1) 电流采样误差,主要是电流采样的精度和频率;2) 电池容量变化导致的误差,即电池的环境温度、电池的老化程度、电池的充放电倍率以及电池的自放电等都会影响到电池的容量;3) SOC 误差,即初始 SOC 的精确获取以及最终 SOC 计算过程中无法避免的取舍误差。

3 融合 SOC 估算方法

3.1 卡尔曼滤波法

对蓄电池而言,运用卡尔曼滤波进行电池的

SOC 估算,是当下一比较主流的研究方向。建立合适的电池等效模型是该方法的核心;通过当下时刻的测量值、上一时刻的预测值以及构建模型的误差,计算得到当下时刻的最优值。其突出优势在于,计算过程考虑了误差,并且该过程中误差独立存在。文献[18-26]均通过建立等效电池模型,运用卡尔曼滤波估算蓄电池的 SOC。此外,有学者对传统卡尔曼滤波进行改进,得到了扩展卡尔曼滤波法^[27-29],进一步提高了计算精度。卡尔曼滤波法的准确度与构建的电池模型的准确度高度正相关,计算复杂。

卡尔曼滤波法适用于电流波动比较剧烈的情况,对 SOC 初值的要求不高,但对电池模型的精度要求很高。

3.2 神经网络法

近年来,电池 SOC 估算研究方法中也引入了人工智能算法,主流采用的是 BP(back propagation)神经网络。根本上是对反映电池状态的参数样本的数据处理,其中对样本数据的选取和处理是重点,对电池本身的内部结构无需做深入的研究,就能得出电池运行中的 SOC 值。

将神经网络算法用于电池 SOC 估算,前期准备数据,后期处理相对简单。基于实验电路,文献[30-31]构建样本集,主要包含以下数据:蓄电池的端电压 $U(t)$ 、充放电电流 $I(t)$ 、欧姆内阻 $R(t)$ 、温度 $T(t)$ 和荷电状态 $S(t)$,然后利用 RBF 神经网络模型预测 SOC,准确度较高,但实验电路太过理想,实验不具普适性。

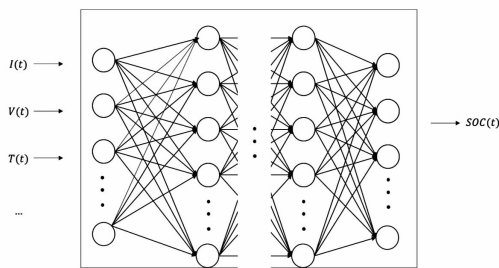


图 1 神经网络估算 SOC

文献[32]文献提出利用 LIBSVM 支持向量机,结合实验样本数据,建立了蓄电池的 SOC 预测模型,实验结果指出该方法优于传统的 BP 神经网络。文献[33]提出了基于稀疏采样数据的电池 SOC 单步预测法。选取了表征电池状态的部分参

数,并以此历史数据构建了 SOC 训练数据集,采用支持向量机(support vector machine, SVM)进行数据的预训练,其中 SVM 的最优参数通过贝叶斯算法获取,实验结果表明该方法具有较高的鲁棒性。

文献[34]在传统 BP 神经网络的基础上加以改进,提出了基于改进遗传算法的 BP 神经网络的蓄电池 SOC 估算方法,其仿真实验结果表明,该方法提高了估算精度,具有较好的收敛性。基于 Matlab 仿真,文献[35]设计的基于 LSTM 神经网络电池 SOC 预测模型较传统 SOC 估计方法的精度高,但提升不是特别明显。文献[36-41]通过选取与电池状态息息相关的参数,如温度、电流、老化程度等,建立神经网络模型,估算电池的 SOC 值。但是,该算法需要大量的样本数据,其对最终训练结果有重大的影响,特征量的取舍会带来误差^[42]。

神经网络法可在线估计,不需要精确的 SOC 初值,但需要大量的实验数据训练。

3.3 综合法

单一的方法,各有缺陷,综合使用上述方法,可以提高 SOC 估算精度^[43-55]。

文献[43]的实验结果表明,扩展卡尔曼滤波结合无迹卡尔曼滤波算法有效地降低了 SOC 估算中的噪声,提高了估算精度。文献[44]基于蓄电池的戴维南二阶模型,其二阶模型参数通过最小二乘法确定,采用神经网络模型确定开路电压和 SOC 之间的非线性关系,最后通过主从式自适应无迹卡尔曼滤波估算 SOC,实验结果指出相比于扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)、无迹卡尔曼滤波(unscented Kalman filter, UKF)算法,该方法估算精度高、收敛速度快。

文献[45]在分裂电池模型的基础上,引入了带遗忘因子的递推最小二乘法,最后利用 UKF 算法对蓄电池的 SOC 进行估算,提高了估算精度。文献[46]结合蓄电池的 Thevenin 一阶 RC 等效电路模型、RLS 和改进的双卡尔曼滤波(improved dual extended Kalman filter, I-DEKF)算法进行 SOC 估算,减小了传统安时积分法的误差;此外有实验表明结合蓄电池的二阶 RC 等效电路模型、递归最小二乘法(recursive least square, RLS)和改进的 Sage-Husa 估计器对 SOC 估算过程的噪声进行抑制,提高了估算精度^[47]。文献[48]融合门控循环单元神经网络和 Huber-M 估计鲁棒卡尔曼滤波算法,有效

地降低了锂离子电池 SOC 估算中存在的测量误差。文献[49]在传统高斯过程模型的基础上,引入了 K-means 聚类算法与最大期望(expectation maximization, EM)算法对传统模型参数进行更新,实验结果显示该方法的估算精度要优于传统高斯过程回归方法。

文献[50]针对电池的 SOC 估算提出了一种电池状态分阶段处理的思想,但适用场景比较单一,仅适用于纯电动物流车。

文献[51]创新性地将分数阶微积分用于电池 SOC 估算,结合卡尔曼滤波法,提高了 BMS 中 SOC 估算的准确性。文献[52]设计了离散滑模观测器,结合电池的戴维南等效模型,进行模型的参数识别,实验结果优于扩展卡尔曼滤波法,但忽略了模型本身的误差,不具普适性。

文献[53]设计了电池管理系统和监控平台,提出了将安时计量法和等效电动势法相结合的并联加权反馈算法来估算电池 SOC,估算准确度要优于传统并联加权算法。单实验数据与电池实际的状态数据有差距,不适用现场工况。

4 结 语

对于蓄电池而言,由于工况变化复杂,基于传统的单一变量,如 $U(t)$ 、 $I(t)$ 的开路电压法和安时积分法误差较大。神经网络法和卡尔曼滤波法融合多个变量,其估算准确度要优于传统单一估算方法,但是卡尔曼滤波法和神经网络法受限于电池模型和训练数据,而且算法复杂。影响电池容量的因数众多,有电流、电压、环境温度、寿命等,在电池 SOC 估算算法中应当综合考虑多种因数。BMS 中储存了大量的历史运行数据,如何将这些历史数据与数据挖掘和深度学习等技术很好地结合起来,将是电池 SOC 估算的重要途径。

参考文献

- [1] 李匡成,季亚昆,刘政. 蓄电池模型研究综述[J]. 电源技术,2017,41(3):505-507.
- [2] 王鹏程,朱长青. 铅酸蓄电池监测系统发展综述[J]. 电源技术,2020,44(4):636-639.
- [3] 廖晓军,何莉萍,钟志华,等. 电池管理系统国内外现状及其未来发展趋势[J]. 汽车工程,2006,28(10):

- 961 - 964.
- [4] 杨亚丽,孙磊,李匡成.多用户实时控制快速充电技术研究[J].电测与仪表,2011,48(10):77 - 79.
- [5] 刘彦忠,张奕黄,王大龙.车用动力锂电池的 SOC 估计[J].电力电子技术,2012,45(12):48 - 50.
- [6] 季迎旭,杜海江,孙航.蓄电池 SOC 估算方法综述[J].电测与仪表,2014,51(4):18 - 22.
- [7] 华周发,李静.电动汽车动力电池 SOC 估算方法综述[J].电源技术,2013,37(9):1686 - 1689.
- [8] 陈燎,戴俊,盘朝奉.动力电池荷电状态研究的可视化分析[J].电池,2020,50(2):187 - 190.
- [9] 王曦,伍联营,张伟涛,等.铅酸电池开路电压的测量及其与累积放电量的关系[J].储能科学与技术,2018,7(1):75 - 79.
- [10] 朱春波,武国良,陈清泉.基于 EMF 等效模型电动车镍氢电池 SOC 估计[J].电力电子技术,2008,41(10):48 - 49.
- [11] 冯真得,何耀,刘新天,等.基于容量修正的阀控式铅酸蓄电池 SOC 估计[J].电源技术,2017,41(1):68 - 70.
- [12] 朱春波,武国良,陈清泉.基于 EMF 等效模型电动车镍氢电池 SOC 估计[J].电力电子技术,2008,42(10):48 - 49.
- [13] John Chiasson, Baskar Vairamohan. Estimating the State of Charge of A Battery [J]. Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(3):465 - 470.
- [14] Dennis Doerffel, Suleiman Abu Sharkh. A Critical Review of Using the Peukert Equation for Determining the Remaining Capacity of Lead - acid and Lithium - ion Batteries [J]. Power Sources, 2006, 155(2):395 - 400.
- [15] 杨文荣,朱赛飞,陈阳,等.基于改进安时积分法估计锂离子电池组 SOC [J]. 电源技术, 2018, 42(2):183 - 184.
- [16] 于海芳,逯仁贵,朱春波,等.基于安时法的镍氢电池 SOC 估计误差校正[J].电工技术学报,2012,27(6):12 - 18.
- [17] 罗勇,祁朋伟,黄欢,等.基于容量修正的安时积分 SOC 估算方法研究[J].汽车工程,2020,42(5):681 - 687.
- [18] 王金铎,俞万能,朱永怀,等.基于 SOC 估算的船用锂电池组健康管理[J].船舶工程,2020,42(4):15 - 20.
- [19] Daniil Fadeev, 张小周,董海鹰,等.基于模糊卡尔曼滤波器的锂电池荷电状态与健康状态预测(英文)[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2020, 11(1):63 - 69.
- [20] 安昌祖,张蕊萍,张小周,等.基于模糊无迹卡尔曼滤波算法的锂电池 SOC 估计[J].电源技术,2020,44(3):333 - 336.
- [21] 丁稳房,付晓光,张轩豪.基于自回归各态历经模型参数辨识的模糊双卡尔曼滤波算法的储能电池荷电状态估算[J].科学技术与工程,2020,20(6):2299 - 2304.
- [22] 宋绍剑,魏黄娇,宋春宁.基于 AEKF 的锌镍单液流电池 SOC 估计[J].电池,2020,50(1):50 - 53.
- [23] 夏飞,王志成,郝硕涛,等.基于卡尔曼粒子滤波算法的锂电池 SOC 估计[J].系统仿真学报,2020,32(1):44 - 53.
- [24] 刘毅,谭国俊,何晓群.优化电池模型的自适应 Sigma 卡尔曼荷电状态估算[J].电工技术学报,2017,32(2):108 - 118.
- [25] 赵天意,彭喜元,彭宇,等.改进卡尔曼滤波的融合型锂离子电池 SOC 估计方法[J].仪器仪表学报,2016,37(7):1441 - 1448.
- [26] 毛华夫,万国春,汪镭,等.基于卡尔曼滤波修正算法的电池 SOC 估算[J].电源技术,2014,38(2):298 - 302.
- [27] 张博远,罗羽,杨玉新,等.基于扩展卡尔曼滤波的 SOC 估算与仿真[J].舰船电子工程,2020,40(1):99 - 102.
- [28] 高文哲,黄涛.基于扩展卡尔曼滤波模型的电动汽车锂电池 SOC 估算研究[J].通信电源技术,2020,37(1):44 - 45.
- [29] 刘嘉林,申江卫,吕天阳,等.基于扩展卡尔曼滤波的锂离子电池 SOC 估计[J].农业装备与车辆工程,2019,57(12):97 - 99.
- [30] 赵轩,康留旺,汪贵平,等.基于 BP 神经网络的 SOC 估计及铅酸蓄电池特性[J].电源技术,2014,38(5):874 - 877.
- [31] 米林,赵孟娜,秦甲磊,等.基于径向基函数神经网络的电动汽车动力电池 SOC 模型[J].重庆理工大学学报(自然科学),2011,25(10):1 - 5.
- [32] 陈凯,彭仲哈,吴启瑞,等.基于 LIBSVM 的铅酸蓄电池荷电状态估计[J].电源技术,2020,44(4):578 - 581.
- [33] 鲍伟,葛建军.基于稀疏采样数据的电动公交车电池 SOC 预测方法研究[J].汽车工程,2020,42(3):367 - 374.
- [34] 于仲安,卢健,王先敏.基于 GA - BP 神经网络的锂离子电池 SOC 估计[J].电源技术,2020,44(3):337 - 340.
- [35] 郑永飞,文怀兴,韩昉,等.基于 LSTM 神经网络的动力电池 SOC 估算研究[J].计算机应用与软件,2020,37(3):78 - 81.