

On-Line Health Assessment of Substation Battery Based on Fuzzy Logic *

FAN Xinxin¹, DING Hui¹, CHEN Xiuguo¹, WANG Jianbin¹, YAN Hongmei²

(1.State Grid Tongling Power Supply Company, Tongling Anhui 244000, China;

2.State Grid Zongyang Power Supply Company, Tongling Anhui 246700, China)

Abstract: In order to ensure the safety and reliability of dc power supply equipment operation, it is very important to improve the ability of evaluating the state of health (SOH) of lead-acid battery. An online detection method for SOH prediction based on fuzzy logic is proposed, the linear relationship between the amount of charge and the open circuit voltage of the battery in charge and discharge state is used to detect the SOH of the battery online and offline respectively. The experimental results show that the traditional offline method is consistent with the online method, and the errors are close to 2%. Compared with SOC online detection method, SOH has the characteristics of higher sensitivity and faster convergence for battery health assessment.

Key words: valve-regulated lead-acid battery; state of health; fuzzy logic; online inspection

EEACC: 8410

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.01.026

基于模糊逻辑的变电站蓄电池在线健康状态评估 *

樊欣欣¹, 丁 晖¹, 陈秀国¹, 王建宾¹, 严红梅²

(1. 国网铜陵供电公司, 安徽 铜陵 244000; 2. 国网安徽枞阳供电公司, 安徽 铜陵 246700)

摘 要: 为了保证变电站直流电源设备运行的安全可靠, 提高铅酸蓄电池健康状态 (State of Health, SOH) 的评估能力至关重要。提出了一种基于模糊逻辑预测 SOH 的在线检测法, 利用蓄电池在充放电状态下电荷量与开路电压之间的线性关系分别在线、离线检测蓄电池的 SOH。实验结果表明, 传统的离线法与在线法评估的结果一致, 误差均接近 2% 左右。与 SOC 在线检测方法相比, SOH 对蓄电池健康评估具有灵敏度高、收敛快等特点。

关键词: 密封式阀控铅酸蓄电池; 健康状态; 模糊逻辑; 在线检测

中图分类号: TM912

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2021)01-0136-05

密封式阀控铅酸蓄电池 (Valve-Regulated Lead-Acid Battery, VRLA) 具有寿命长、污染小、免维护等优点, 被广泛应用于 UPS 设备、铁路机车的起动电源、应急照明设备、电子、医疗仪器设备等领域^[1]。

目前变电站内常用的蓄电池主要以 VRLA 为主, 它是站内直流电源系统的核心组成部分, 其健康状况的好坏直接影响着变电站内继电保护设备、通信设备、自动装置等二次设备的安全运行, 它是电网处于异常和突发情况下, 保障高设备可靠供电的最后一道防线^[2]。健康状态 (State of Health, SOH) 是电池剩余额定容量的量度, 它是衡量 VRLA 性能的重要特征, 如何较为精确地预测 SOH 状态成为了评估蓄电池性能优劣的关键^[3]。由于蓄电池因充放电以及老化等

非线性因素的影响, 其内部电化学成分不断的退化, 这对蓄电池的容量估算带来了极大的不便, 因此对 SOH 的精准估算成为了迫切研究的课题之一。

本文根据蓄电池的动态模型, 确定了蓄电池电荷量和开路电压的关系, 并以三组蓄电池 SOH 为输出参量, 建立了基于 $Q-V_{oc}$ 斜率与 SOH 规则库的模糊逻辑系统, 并分别与传统的离线核对性放电试验以及基于 EKF 的 SOC 在线检测作比较, 实现了变电站 VLAR 在线健康状态精确评估。

1 VRLA 的动态模型

为了描述蓄电池 VRLA 动态特性, 方便在线 SOH 的评估, 选取了具有二阶 RC 特征电路的 Massimo

项目来源: 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目 (2016 第 96 号)

收稿日期: 2020-05-07 修改日期: 2020-06-30

Ceraolo 模型,如图 1 为该 VRLA 电池的简化等效电路。其中 V_0 表示蓄电池的端电压, R_i 为蓄电池的等效内阻。双层电容器 C_s 为 VRLA 内部电解质或者电极接口处电荷分离产生的电容大小, 表面电阻 R_t 为反应电池内部扩散电容 C_s 的阻抗大小。电容 C_b 为电池的储存能力与其内阻 R_d 用来模拟蓄电池电压缓慢稳定的过程。当 VRLA 处于放电状态时, 由于 R_t 与 C_s 组成闭合回路, 蓄电池存储在电容 C_s 中的电荷将对回路电阻实现快速放电, 经过一段时间, 电路进入稳定状态, 此时, 蓄电池的开路电压 V_{oc} 相当于整个 C_b 的电压即为满充抑制电压 V_{Cb} 。

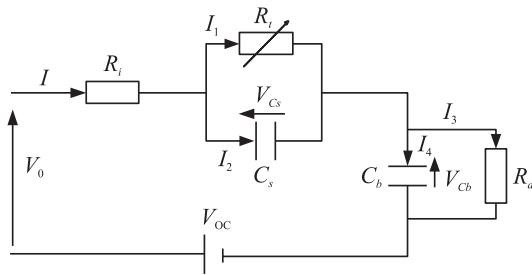


图 1 VRLA 等效电路

根据参考文献[4-5], 可得到蓄电池的开路电压与荷电状态(State of Charge, SOC)具有以下线性关系:

$$V_{oc}(t) = a_1 SOC(t) + V_{ch} \quad (1)$$

若以安培小时做计量, 假定初始时刻 t_0 时 VRLA 的荷电量为 $SOC(t_0)$, 则可以得出任意瞬态响应时刻的 $SOC(t)$ 为:

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{\int_{t_0}^t I(\tau) d\tau}{Q_{Max-New}} \times \eta \quad (2)$$

$$Q = \int_{t_0}^t I(\tau) d\tau \quad (3)$$

式中: η 是电池由充电到放电完的转化效率; I 表示电池的瞬态电流, $Q_{Max-New}$ 为完全健康的蓄电池额定容量即可理解为出厂值, Q 为任意 t 时刻内存储的电荷量。

因此, 可以得出, VRLA 在充电和放电过程中, 理论上电荷量 Q 与开路电压 V_{oc} 成线性关系, 这与通过实验得到的图形 2 基本吻合。因此, 在后面的章节中可以根据 $Q-V_{oc}$ 与 SOH 的关系对为未知 SOH 进行预测。

图 2 为四组 SOH 蓄电池充电状态下的 $Q-V_{oc}$ 曲线图, 其中第一组为完全健康的蓄电池对应图中 SOH1=100% 曲线, 第二组为投入运行一段时间后的蓄电池对应图中 SOH1=68% 曲线, 第三组蓄电池为报废的蓄电池对应图中的 SOH1=42% 曲线, 第四组蓄电池对应 SOH4 的曲线。后续章节将用第四组

蓄电池作为本文评估的对象。

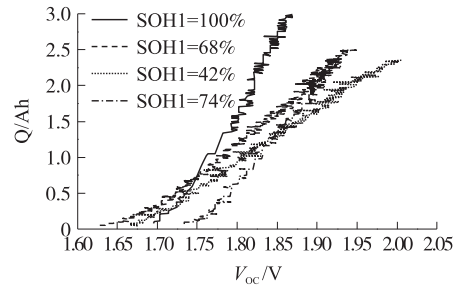


图 2 四组 SOH 蓄电池充电状态下的 $Q-V_{oc}$ 曲线图

2 SOH 的模糊逻辑评估

传统的蓄电池离线法^[6-7]即核对性放电试验虽能有效地对蓄电池的容量进行核对, 但是因为其放电的过程处于深度放电, 不仅试验的周期长, 而且试验本身是一种不可逆的过程, 这会对蓄电池造成一定的破坏。因此不宜经常对 VRLA 进行核对性试验^[8]。

由于 VRLA 蓄电池自身是一个复杂的化学系统, 在不同充放电状态下, 其电解液内部的铅离子等价结构将发生明显的变化, 而且在充电过程中还会伴随着氧析现象, VRLA 还易受到环境温度变化对其放电容量、寿命、内阻产生影响。正是这些不可控因素, 造成对 VRLA 的 SOH 评估带来了诸多不确定性, 而模糊逻辑系统正是对这种复杂性、非线性、不确定性进行有效评估的手段之一。

2.1 模糊逻辑系统的算法

模糊逻辑系统如图 3 所示, 主要包括四部分组成, 其中模糊规则库是模糊控制器的核心, 是由一组 If-Then 型式的模糊规则所组成, 这组模糊规则是用以描述系统的输入输出关系^[9-10], 模糊化机构是将输入端确定的数据通过模糊器件转化成模糊数据集合, 模糊推理引擎通过模仿人类大脑的思考模式按照规则库制定的约束条件对输入模糊化机构进行推理分析, 最后根据推理的结果再完成去模糊化的过程。

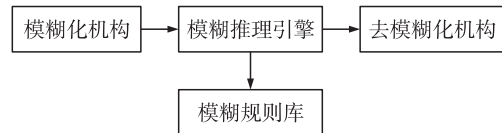


图 3 模糊逻辑系统的基本构架

模糊规则如下:

$$R_i: \text{if } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ and } \cdots x_n \text{ is } A_{in}$$

$$\text{Then } y_i = f_i(x)$$

$$i \in \{1, 2, 3, \cdots, n\}$$

$$x = (x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n)^T$$

式中: $x_i \in R^n$ 为输入参数; $y_i \in R$ 为输出参数; R_i 为第 i 个参数的规则, n 为规则总数, A_i 为第 i 个规则

的前件模糊集合,是由隶属度功能函数 U 进行确定,用来实现模糊集合映射到 $[0,1]$ 的函数。

$$U_{A_i}(x):R^n\rightarrow[0,1]$$

式中:逻辑 0 表示不属于模糊集合的参数,反之逻辑 1 表示属于模糊集合的参数,在区间内则表示部分参数满足模糊集合。

2.2 模糊参数的选择

根据第一章节得出的结论可知,VRLA 等效电路中瞬态响应所对应的荷电量与其开路电压成线性关系,可以通过拟合图 1 来更好地反映这种线性系数。为此采用递归最小二乘法(RLS)对曲线的波形进行平滑滤波处理,得到的结果如图 4 所示。由于第四组蓄电池属于待估测的 VRLA,在图 4(b)中将不再体现。

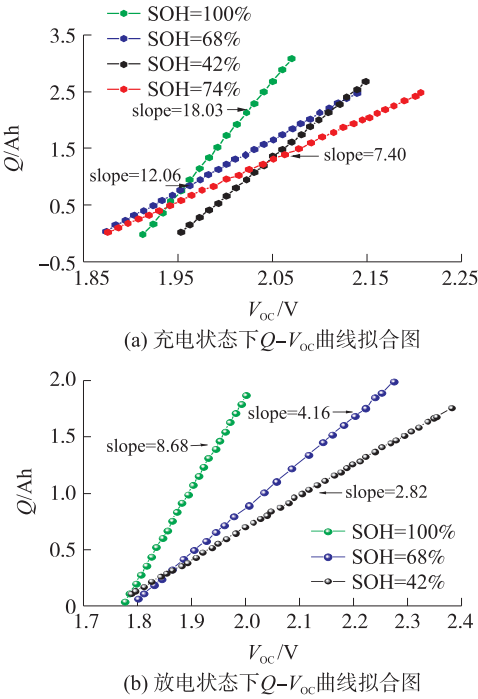


图 4 不同 SOH 蓄电池状态的 $Q-V_{oc}$ 曲线拟合图

表 1 充电过程参量的选择

输入参量	输出参量
$Q-V_{oc}$ slope	SOH
18.03	100%
12.06	68%
7.40	42%

表 2 放电过程参量的选择

输入参量	输出参量
$Q-V_{oc}$ slope	SOH
8.68	100%
4.16	68%
2.82	42%

根据图 4 所示的线性关系,在充电和放电过程中,使用当前或以前的数据样本以在线方式估计,分别选取 SOH 为 100%、68%、42% 所对应 $Q-V_{oc}$ 斜率及其相应的 SOH 值作为参数构建模糊系统,用于在线估计第四组 VRLA 的 SOH。

2.3 模糊逻辑系统的设计

本文设计了两个模糊逻辑系统进行 SOH 估计,一个用于充电即在线检测,另一个用于放电即离线检测,其模糊系统如图 5 所示。

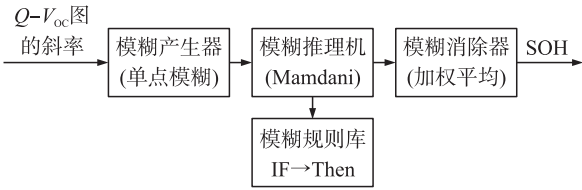


图 5 VRLA 充放电过程的模糊系统

对模糊系统的输入是 $Q-V_{oc}$ 图的斜率,输出是 SOH。定义输入和输出的语言变量的隶属度选择三角函数法。其系统推理机制为 Mamdani 算法,同时其模糊集合只有两个状态。在这里充电状态用逻辑 0 表示,放电状态用逻辑 1 表示,模糊集合隶属于 $[0,1]$,最后分别选择单点模糊器和加权平均法解模糊器设计两个模糊系统。

其中模糊 IF-THEN 规则定义如表 3,该模糊规则库由四个规则组成,这使得模糊系统具有简单,计算很少,收敛快的特点。因此,该方法可应用于廉价的模糊控制器。

表 3 模糊规则

1	IF slope is very small, THEN SOH is 0%
2	IF slope is small, THEN SOH is 46%
3	IF slope is medium, THEN SOH is 64%
4	IF slope is large, TEHN SOH is 100%

3 蓄电池健康状态的评估与验证

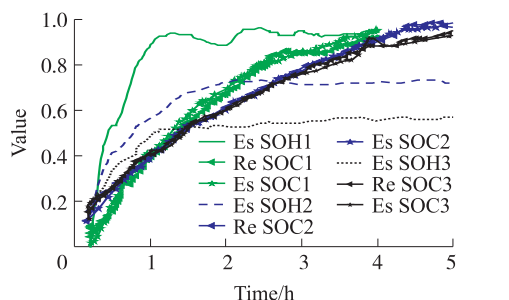
在对蓄电池健康状态预测中,有部分文献[11-12]仅仅利用安倍小时法对其进行评估,为了验证 SOC 与 SOH 对健康状态敏感程度,以变电站通信机房标称容量为 250 Ah 2 V 单节理士蓄电池 DJ250 为例。

实验中,首先利用安倍小时法或者蓄电池测试仪密特 MDX-600 测量出四组蓄电池对应的 SOC 大小,即为图 6 中 Re SOC1、Re SOC2、Re SOC3、图 7 的 ReSOC4;其次分别对四组 VRLA 各自进行核对性充放电试验测出其额定容量,再根据 SOH 的式(4)

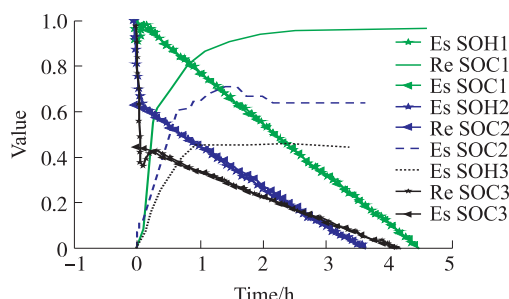
计算出各自的 SOH 值, 对应于图 4 中 Re SOH1、Re SOH2、Re SOH3、图 2 的 SOH4。

$$SOH = \frac{Q_{Max-Old}}{Q_{Max-New}} \quad (4)$$

式中: $Q_{Max-New}$ 为完全健康的蓄电池额定容量, $Q_{Max-Old}$ 蓄电池的实际容量。

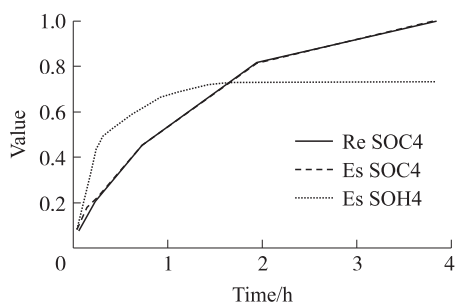


(a) 在线充电状态下SOC与SOH的验证

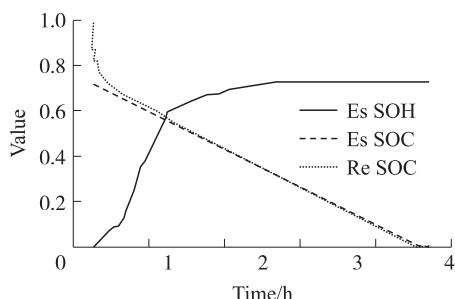


(b) 离线核对性放电状态下SOC与SOH的验证

图6 前三组蓄电池在充放电状态下SOC与SOH的验证



(a) SOC与SOH的在线验证



(b) SOC与SOH离线验证

图7 前三组蓄电池分别进行在线与离线下的验证

最后, 根据设计的模糊逻辑系统估算出三组蓄电池的 SOH, 对应于图 4 中 Es SOH1、Es SOH2、Es SOH3、图 7 的 Es SOH4。再根据文献[13-15], 使用 EKF 算法在每个采样时间内估计 SOC, 对应于图 4

中 Es SOC1、Es SOC2、Es SOC3、图 7 的 Es SOC4。

最终汇总的结果如图 6 与图 7 所示, 其中通过图 6 可以得出: VRLA 在充电和放电环节下, 尽管 EKF 算法能够很好地预测 SOC 的值, 然而 SOC 在线检测时即 VRLA 充电环节, 其趋于收敛的速度明显慢于 SOH, 而且不同 SOH 蓄电池所对应的 SOC 曲线很难辨认, 尤其当两个 SOH 值差距不大时, 这说明 SOC 对蓄电池在线健康敏感度低于 SOH, 因此很难利用 SOC 在线判断变电站蓄电池的健康情况。通过图 6(a) 不难发现, SOH 可以很好地在线评估蓄电池健康状态的恶化程度。

对于第四组 VRLA 的 SOH 在线估计, 根据图 7 不难发现在充电和放电过程中, 当曲线收敛时 SOH 估计值分别为 75% 和 76%, 其误差接近 2% 左右。同样, 在图 6 中也能得到前三组 VRLA 的 SOH 估计误差值一致的结论, 这表明了该方法的准确性。

4 结论

本文提出了一种针对变电站 VRLA 铅酸蓄电池健康状态 SOH 在线估计的新方法。从理论与实验共同验证了电荷量与蓄电池开路电压之间线性关系, 建立了基于 $Q-V_{oc}$ 斜率与 SOH 规则库的模糊逻辑系统, 评估了未知电池的 SOH 参量。实验结果表明, 在充电和放电过程中, 均能实现 SOH 的准确估计, 具有系统简单, 成本低廉, 在线测试短的特点。

参考文献:

- [1] 樊欣欣, 杨连营, 丁晖, 等. 三电平通信电源逆变器的故障建模及诊断[J]. 电子器件, 2018, 41(6): 1426-1430.
- [2] 项盛荣, 樊欣欣, 严红梅. 基于低频低噪声检测放大器的设计与分析[J]. 电子器件, 2019, 42(2): 383-386.
- [3] 唐骏宇, 冯长江. 基于模糊辨识的蓄电池 SOH 测量方法[J]. 电源技术, 2018, 42(2): 244-246.
- [4] 唐骏宇, 冯长江. 基于模糊辨识算法的蓄电池荷电状态测量方法与模块设计[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(2): 39-42.
- [5] Hariprakash B, Martha S K, Jaikumar A, et al. On-Line Monitoring of Lead-Acid Batteries by Galvanostatic Non-Destructive Technique[J]. Journal of Power Sources, 137(1): 128-133.
- [6] 张冬, 陈冬, 范俊杰, 等. 变电站 VRLA 电池 3 h 率核对性放电技术研究[J]. 电源技术, 2018, 42(11): 1707-1709.
- [7] 杨建明, 胡钊, 周锋, 等. 电力通信蓄电池核对性放电试验实例[J]. 电工技术, 2018(21): 145-147.
- [8] 裴海玲. 阀控蓄电池核对性充放电的注意事项[J]. 科技与企业, 2013(24): 420.
- [9] 董景荣, 杨秀芬. 基于模糊逻辑系统的非线性组合预测方法研究[J]. 管理科学学报, 1999(3): 28-32.
- [10] 吴捷, 严华. 基于自适应模糊逻辑系统的短期负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(17): 35-37.
- [11] Piller S, Perrin M, Jossen A. Methods for State-of-Charge Determination[J]. Journal of Power Sources, 114(1): 125-133.

nation and Their Applications [J]. Journal of Power Sources, 2019, 96(1): 113-120.

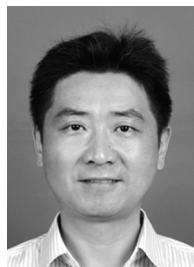
- [12] Tasumi S, Velikovskiy C A, Xu G, et al. High-Affinity Lamprey VRLA and VLRB Monoclonal Antibodies[J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2017,

106(31): 12891.

- [13] 王长清, 朱敏. 基于复合 EKF 算法的锂电池组的 SOC 估计[J]. 电源技术, 2015, 39(2): 285-286, 342.
- [14] 刘欣博, 边亚伟, 王慧娟. 蓄电池模型参数辨识及在 SOC 估计中的应用[J]. 北方工业大学学报, 2018, 30(2): 27-35.



樊欣欣(1990—),男,安徽亳州人,国网铜陵供电公司,工程师,硕士,研究方向为电力通信蓄电池状态监测, Fanxxok@126.com;



丁 晖(1967—),男,安徽巢湖人,国网铜陵供电公司,高级工程师,学士,长期从事电力信息通信管理工作;



陈秀国(1968—),男,安徽安庆人,国网铜陵供电公司,高级工程师,学士,主要从事电力通信管理工作;



王建宾(1982—),男,河北保定人,国网铜陵供电公司,高级工程师,学士,主要从事电力通信管理工作。