

基于谐波阻抗测量在线估测蓄电池荷电状态^{*}胡益民¹ 曹亚杰^{1,2} 敬刚¹ 刘岩¹

(1. 深圳清华大学研究院光机电一体化重点实验室 深圳 518057;

2. 深圳大学机电与控制工程学院深圳电磁控制重点实验室 深圳 518060)

摘要: 现行内阻法估测蓄电池荷电状态时,需要对被测蓄电池实施大电流放电操作以测量其欧姆内阻,在线检测时可能对用电负载造成安全隐患。针对这一问题,提出一种基于谐波阻抗测量技术在线估测蓄电池荷电状态的方法:对被测蓄电池实施周期性的小电流放电操作,测量放电过程中的放电电流与蓄电池端电压,经傅里叶分析计算出蓄电池的谐波阻抗,对谐波阻抗数据进行数值拟合得到蓄电池的欧姆内阻,最终实现对蓄电池荷电状态的在线估测,从而避免现行方法所需要的大电流放电操作。

关键词: 蓄电池;谐波阻抗;剩余电量;荷电状态

中图分类号: TM912.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Harmonic impedance measurement based on-line estimation
for SOC of storage batteryHu Yimin¹ Cao Yajie^{1,2} Jing Gang¹ Liu Yan¹

(1. Optomechatronics Key Lab, Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China; 2. Research Institute of Electromagnetic Control, College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060 China)

Abstract: Large current discharge to battery, which is required in order to measure the ohmic internal resistance for state-of-charge (SOC) estimation adopted by conventional internal resistance method, may pose security risks to electrical load during online operation. To solve this problem, this paper proposes a technique based on harmonic impedance measurement technology to estimate storage battery SOC online; discharges the objective storage batteries with periodic and small current, measuring the discharge current and terminal voltage of the battery during the discharge process, calculate the harmonic impedance of the storage battery according to Fourier analysis technique, least squares method is used for numerical simulation of harmonic impedance data to get the objective battery ohmic resistance, and finally realizes the online estimation for the storage battery SOC without the large current discharge operation required in conventional methods.

Keywords: storage battery; harmonic impedance; state-of-charge; SOC

1 引言

蓄电池的荷电状态(state of charge, SOC)表征蓄电池剩余电量的多少,在数值上定义为蓄电池的剩余电量占其额定容量的百分比^[1-2]。蓄电池用户希望能够随时了解蓄电池的SOC信息,以便确定是可以放心使用蓄电池,还是必须对其进行维护。由于SOC是蓄电池的一种内在特性,无法进行直接测量。蓄电池SOC的无损检测一直是国内外的研究热点与难点。

常用的估测蓄电池SOC的方法主要有:放电实验法、开路电压法、安时计量法、内阻法、卡尔曼滤波法、模糊推理

法以及基于神经网络模型的方法^[3-8]等。其中,内阻法作为IEEE的推荐性标准^[9],是目前行业公认的蓄电池无损检测的最佳方案之一,其核心思想是蓄电池SOC与其等效欧姆内阻之间存在良好的相关性。

实践中,通常采用直流感电法测量蓄电池的欧姆内阻:对被测蓄电池进行瞬间大电流放电操作(10倍于 I_{10} 量级的电流),测量其两端的瞬间电压降,依据欧姆定律计算出被测蓄电池的欧姆内阻^[10-12]。蓄电池通常用作备用电源,对蓄电池进行检测维护时,不允许脱开用电负载,大电流的在线放电操作,可能对用电负载造成安全隐患。

针对现行内阻法在线估测蓄电池 SOC 时的局限性,本文提出一种基于谐波阻抗分析技术实现对蓄电池 SOC 的在线估测方法:对被测蓄电池实施周期性的小电流放电操作,测量放电过程中的放电电流与蓄电池端电压,经离散傅里叶变换计算出蓄电池的各次谐波阻抗,再用最小二乘法对谐波阻抗数据进行数值拟合得到被测蓄电池的欧姆内阻,最终实现对蓄电池 SOC 的在线估测,从而避免现行方法所需要的大电流放电操作。

2 蓄电池的内部阻抗及欧姆内阻

测量蓄电池内部阻抗的原理如图 1 所示。图中的信号发生器产生一小幅值频率为 f 的正弦电流 $i(t)$,当 $i(t)$ 流过蓄电池时(充电或者放电),在蓄电池的端电压中会出现与 $i(t)$ 同频率的正弦电压信号 $u(t)$:

$$\begin{aligned} i(t) &= I \sin(2\pi ft + \theta) \\ u(t) &= U \sin(2\pi ft + \theta + \varphi) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: I, θ 为 $i(t)$ 的幅值与相位, U 为 $u(t)$ 的幅值, φ 为 $u(t)$ 与 $i(t)$ 之间的相位差。依据欧姆定律,则蓄电池在频率 f 时的内部阻抗为^[13-15]:

$$Z_f = \frac{U}{I} e^{j\varphi} \quad (2)$$

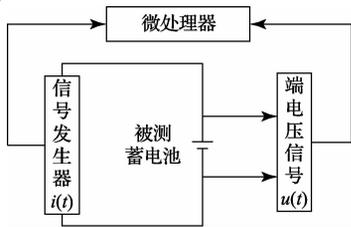


图1 蓄电池内部阻抗测量原理

依据欧拉公式,将式(1)展开成指数形式的傅里叶级数:

$$\begin{aligned} i(t) &= F_i e^{j2\pi ft} + F'_i e^{-j2\pi ft} \\ u(t) &= F_u e^{j2\pi ft} + F'_u e^{-j2\pi ft} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: F_i, F'_i, F_u, F'_u 为相应的傅里叶系数,其值分别为:

$$\begin{aligned} F_i &= \frac{I}{2j} e^{j\theta}, F'_i = -\frac{I}{2j} e^{-j\theta} \\ F_u &= \frac{U}{2j} e^{j(\theta+\varphi)}, F'_u = -\frac{U}{2j} e^{-j(\theta+\varphi)} \end{aligned} \quad (4)$$

于是,式(2)可以写成:

$$Z_f = \frac{U}{I} e^{j(\theta+\varphi-\theta)} = \frac{U e^{j(\theta+\varphi)}}{I e^{j\theta}} = \frac{F_u}{F_i} \quad (5)$$

上式表明:被测蓄电池在频率为 f 时的内部阻抗 Z_f ,即为响应电压 $u(t)$ 与激励电流 $i(t)$ 二者的傅里叶系数之比。

显然,蓄电池的内部阻抗 Z_f 为一依赖于激励频率 f 的复数,定义阻抗 Z_f 的虚部为零时的阻抗值为蓄电池的欧姆内阻 R_Ω ^[16]。

3 谐波阻抗法测量蓄电池欧姆内阻

如图 2 所示,对被测蓄电池实施周期性的小电流放电操作,则有基频为 f 的方波电流 $i(t)$ 流过蓄电池,在蓄电池的端电压中会出现与 $i(t)$ 同频率的电压信号 $u(t)$ 。

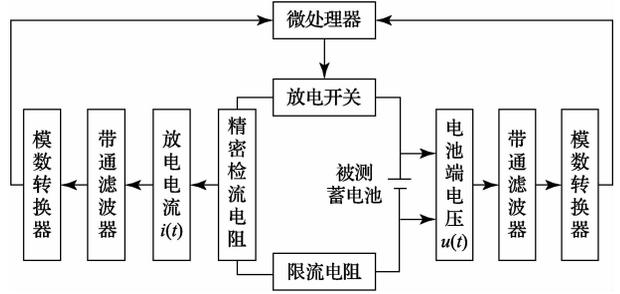


图2 谐波阻抗法测量蓄电池欧姆内阻原理

对放电电流 $i(t)$ 及蓄电池端电压 $u(t)$ 进行传感、滤波、采样后,得到离散时间序列信号 $i(n)$ 和 $u(n)$,分别作离散傅里叶变换得到相应的傅里叶系数为 F_i^k, F_u^k :

$$\begin{aligned} F_i^k &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \\ F_u^k &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: N 为信号序列长度, $n = 0, 1, \dots, N, k = 0, 1, \dots, \frac{N-1}{2}$,则蓄电池的各次谐波阻抗为:

$$Z_f^m = \frac{F_u^k}{F_i^k} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} u(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}}{\sum_{n=0}^{N-1} i(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}} \quad (7)$$

式中: $k = (m \times \frac{f}{f_s} \times N) \bmod \frac{N-1}{2}$, f_s 为采样频率, f 为方波放电电流的基波频率, m 为谐波次数编号, Z_f^m 为蓄电池的第 m 次谐波阻抗。

采用最小二乘法对蓄电池的谐波阻抗数据进行数值拟合,得到阻抗虚部为零时的阻抗值,即为被测蓄电池的欧姆内阻。

4 实验分析

以一只标称参数为 2V/500Ah 的阀控铅酸蓄电池为实验对象,将其放置在通风良好的室温环境下,先将蓄电池按如下“恒流-恒压-涓流”的三阶段充电方式充电至满荷电状态:

- 1) 以 10 h 率对蓄电池进行恒流充电,电池端电压逐渐增大,当电池端电压升至 2.4 V 时改为恒压充电;
- 2) 以 2.4 V 的电压对蓄电池进行恒压充电,充电电流逐渐减小,当电流降至 0.01C(A) 时改为浮充电;
- 3) 以 2.25 V 的电压对蓄电池进行浮充电,充电时间持续 60 min;

静置 30 min 后,以 10 h 率对蓄电池进行恒流放电。放电过程中,采用安时计法实时记录蓄电池的剩余电量,并将此值作为其 SOC 的真实值,采用上文所述方法测量蓄电池的欧姆内阻,记录蓄电池在若干特定 SOC 状态下的欧姆内阻如图 3 所示。

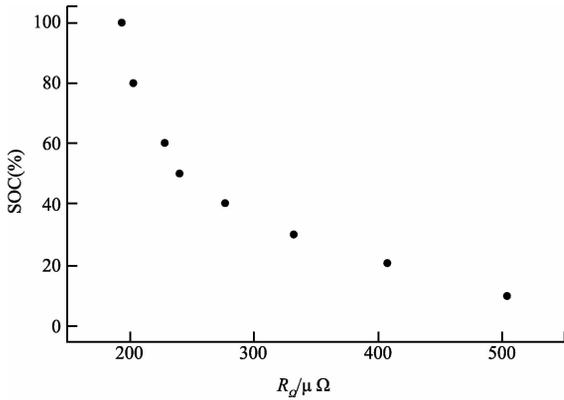


图3 蓄电池在不同SOC时的欧姆内阻

从图3所示的实验结果可以看出:被测蓄电池的欧姆内阻 R_0 随其SOC的减小而逐渐增大,二者之间存在单调函数关系,尤其在 $SOC < 50\%$ 时, R_0 与SOC之间的变化关系近似线性。

为了检验该 R_0 -SOC函数关系的有效性,在同样的实验条件下,调整放电时的电流分别为5h率和15h率,用图3所示10h率的 R_0 -SOC函数关系对被测蓄电池的SOC进行估测,结果如表1所示。

表1 蓄电池SOC估测实验结果

SOC 真实值(%)	5 h 放电率		15 h 放电率	
	SOC	估测	SOC	估测
	估测值	误差(%)	估测值	误差(%)
90	94.257	4.73	87.561	-2.71
80	83.512	4.39	83.184	3.98
70	67.445	-3.65	71.869	2.67
60	61.098	1.83	59.070	-1.55
50	50.895	1.79	51.030	2.06
40	39.488	-1.28	39.368	-1.58
30	30.459	1.53	29.475	-1.75

从表1所示的实验结果可以看出:采用文中所述的蓄电池SOC估测方法,其估测结果的最大误差小于5%,尤其在 $SOC < 60\%$ 时,估测误差在2.5%以内,可以满足实际需求。

5 结 论

基于离散傅里叶变换以及谐波阻抗测量技术,提出一种在线估测蓄电池SOC的方法,使得依据欧姆内阻测量对蓄电池SOC进行实时、在线监测成为可能。

与实践常用的直流放电法相比,该方法无需对被测蓄电池进行大电流放电,其激励信号的产生来自对被测蓄电池的周期性、小电流放电,实际应用时不会对用电负载造成安全隐患,更具工程应用价值。

参考文献

[1] HUNT G. USABC electric vehicle battery test procedures manual [J]. United States Department of Energy: Washington, DC, USA, 1996.

- [2] 麻友良,陈全世,朱元. 变电流下的电池荷电状态定义方法探讨[J]. 电池, 2001, 31(1):7-9.
- [3] 程艳青,高明煜,徐杰,等. 电动汽车动力电池剩余电量在线测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(增刊):182-185.
- [4] 张利,王为,陈泽坚,等. 新能源汽车SOC估算的模糊预测算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(4): 315-319.
- [5] 王秀菊. 蓄电池内阻同蓄电池各类失效模式关系[J]. 电源世界, 2004(4): 45-49.
- [6] 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, 2004, 137(1): 128-133.
- [7] 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.
- [8] 刘征宇,杨俊斌,张庆,等. 基于QPSO-BP神经网络的锂电池SOC预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(3): 224-228.
- [9] "IEEE Standard 1188-2005", Recommended Practice for Maintenance, Testing and Replacement of Valve Regulated Lead-Acid (VRLA) Batteries for Stationary Applications[S]. 2006.
- [10] 朱松然. 蓄电池手册[M]. 天津:天津大学出版社, 1997. 59-75.
- [11] GIESS H, KNIVETON M. IEC 60896-22: the technical requirements for stationary VRLA batteries [C]. Proceedings of Telecommunications Energy Conference, 2003. INTELEC'03, The 25th International, 2003. 437-443.
- [12] 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, 2004, 137(1): 128-133.
- [13] 李立伟,邹积岩. 蓄电池内阻测量装置的研究[J]. 电源技术, 2003, 27(1): 42-44.
- [14] 刘百芬,程海林. 一种新型的蓄电池内阻测量方法的研究及实现[J]. 仪表技术与传感器, 2004(5): 49-50.
- [15] 朱磊,赵林英,多智华,等. 基于LabVIEW实现的电池内阻测试仪[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2005, 10(5): 67-69.
- [16] COOPER K R, SMITH M. Electrical test methods for on-line fuel cell ohmic resistance measurement[J]. Journal of Power Sources, 2006, 160(2): 1088-1095.

作者简介

胡益民,1977年出生,工学博士,高级工程师。主要研究方向蓄电池的性能检测研究。
E-mail: huym@tsinghua-sz.org