

[控制系统]

锂离子电池等效电路模型及参数辨识方法研究

文/河北工业大学电磁场与电器可靠性联合省教育部重点实验室 曹丽鹏 谢 阳 李玲玲
台湾勤益科技大学 李玲玲

分析了锂离子电池等效电路模型的精度和计算量, 选用Thevenin模型作为锂离子电池等效电路模型, 用最小二乘法在HPPC试验工况下对模型参数进行辨识, 并选用端电压为基准值在工况下进行验证。结果表明, Thevenin模型可以较好地反映锂电池端电压变化规律, 模型精度足以满足SoC估算对等效电路模型的要求。

目前, 锂离子电池广泛应用于电力系统储能设备和电动汽车(EVs)动力系统中, 是提高电力系统可靠性, 保证电动汽车续航能力的重要部件。为保证锂离子电池安全、持久、可靠地运行, 对锂离子电池建立可持续监测电池状态的电池管理系统(BMS)是十分必要的。荷电状态(SoC)和健康状态(SoH)是BMS监测的两个重要参数。SoC与电池额定容量相关, 是电池目前的剩余电量, 准确估算SoC对电池的应用有重要作用。SoH用于表征电池的健康状况, 与电池剩余寿命息息相关。

锂离子电池模型是描述电池的影响因素与它的工作特性之间的关系。建立准确有效的电池模型具有十分重要的意义。一方面, 电池SoC的准确估算很大程度上取决于电池模型的准确程度; 另一方面, 在所建立电池模型的基础上, 可以对电池工作中的各种表现进行估计, 从而能研究分析所建电池管理策略的有效性。建立锂离子电池模型是SoC估算过程中必不可少的一环。

锂离子电池等效电路模型

估算电池SoC前, 需要建立反映电池端电压和开路电压关系的电池模型。常用的锂离子电池模型可以分为3类, 分别为简化的化学模型、神

经网络模型和等效电路模型。目前常用的等效电路模型包括Rint模型、PNGV模型、Thevenin模型和二阶RC模型等。Thevenin模型以其计算量小、精度高等特点被常用于锂离子电池SoC估算中。Thevenin等效电路模型如图1所示。

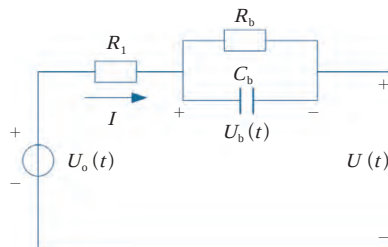


图1 Thevenin等效电路模型

图中电流方向表示电池处于放电过程, 则根据基尔霍夫定律可得

$$I = \frac{U_b}{R_b} + C_b \frac{dU_b}{dt}$$

$$U_o = IR_1 + U_b + U \quad (1)$$

则将方程离散化可得

$$U_b(k+1) = e^{(-\Delta/R_b C_b)} U_b(k) + R_b I (1 - e^{(-\Delta/R_b C_b)})$$

$$U_o = U + R_1 I + U_b \quad (2)$$

式中, R_1 为电池内阻; R_b 为极化内阻; C_b 为极化电容; U_o 为电池开路电压; U 为电池端电压。

根据上述计算公式, 可以得到Thevenin模型的状态方程和输出方程。由于Thevenin等效电路模型能够很好地模拟电池的静态和动态特性, 也考虑

了电池的非线性,且参数获取方法简单,易于转化为状态空间模型,因此,Thevenin模型是锂离子电池SoC估计算法研究中应用较广泛的等效电路模型。

锂离子电池模型参数辨识方法

得到准确的模型参数是模型应用的必要条件和前提条件。锂离子电池等效电路模型参数辨识方法分为在线辨识和离线辨识两种。在线辨识方法可以实时得到等效电路模型参数,有助于提高估算精度,但是对电池管理系统的计算能力提出较高要求,影响了SoC估算的实时性。离线辨识方法在实验室进行即可,不需要对锂离子电池进行实时测量,有助于减少电池管理系统的工作量,在SoC准确估算中得到广泛应用。离线辨识工况以《Freedom CAR功率辅助型电池测试手册》中的HPPC测试试验居多。

本文以额定容量为2 A·h,充放电截止电压分别为4.2 V/2.5 V,充放电最大允许电流分别为2 C/10 C的天津产NMC(正极材料为镍钴锰三元锂离子)电池作为研究对象,对其Thevenin模型参数进行辨识及验证。

1. HPPC测试工况

混合脉冲功率性能测试(The hybrid pulse power characterization, HPPC)是《Freedom CAR功率辅助型电池测试手册》中的电池参数测试试验。根据手册可知,HPPC测试试验通过对电池施加HPPC单个测试脉冲,从而激发电池响应,通过电池的响应曲线、输入脉冲及电池模型来计算出电池模型参数。HPPC单个试验脉冲电流曲线如图2所示(放电电流为正)。

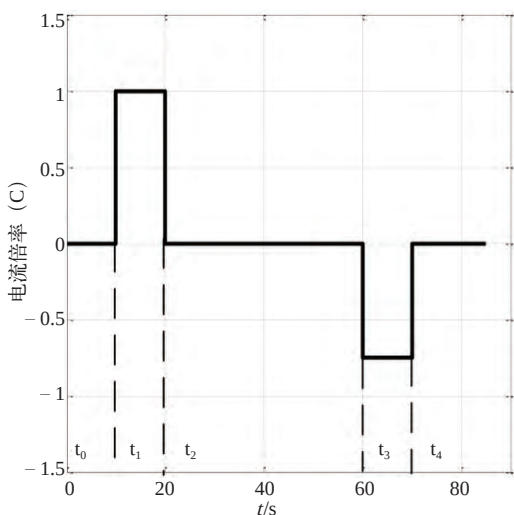


图2 管理系统流程图

HPPC单个试验脉冲试验步骤说明如下:

- 1) t_0-t_1 : 电池充分静置。
- 2) t_1-t_2 : 以1 C电流恒流放电10 s。
- 3) t_2-t_3 : 电池静置40 s。
- 4) t_3-t_4 : 以0.75 C电流恒流充电10 s。

完整的HPPC试验是在锂电池处于不同SoC时,施加HPPC单个试验脉冲。在HPPC单个试验脉冲作用下,锂离子电池端电压表现出一系列的电池特性,可根据端电压变化得到电池模型参数。锂离子电池端电压变化曲线如图3所示。

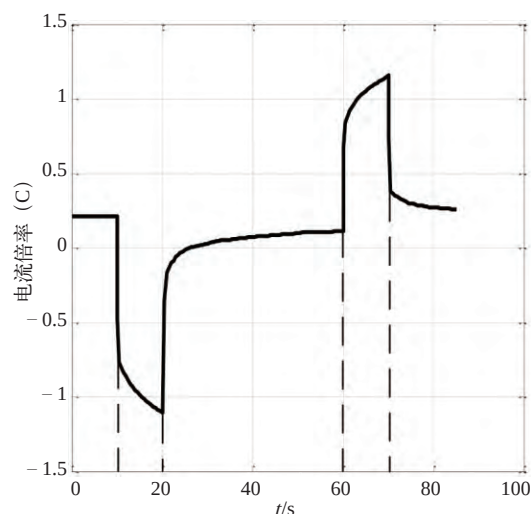


图3 锂电池端电压变化曲线

2. Thevenin模型参数辨识

应用最小二乘法在HPPC工况下对锂离子电池Thevenin模型参数进行辨识是最常用的一种方法。

(1) 欧姆内阻 R_1

锂电池两端放电结束后,端电压有瞬间的上升现象。锂离子电池充电结束后,端电压有瞬间的下降现象。端电压瞬间的突变体现了电池的内阻特性。根据电池的内阻特性计算电池欧姆内阻。则电池欧姆内阻为

$$R_1 = \frac{|U_{t2} - U'_{t2}|}{I} \quad (3)$$

式中, U_{t2} 、 U'_{t2} 分别为 t_2 时刻放电电流撤去前后电池端电压; I 为放电电流大小。

(2) 时间常数 τ

在锂电池静置阶段的40 s内,电池端电压出现回升现象,这种回升现象是由于电池极化现象引起的。由Thevenin模型可知,极化电阻 R_b 和极化电容 C_b 组成的RC回路表征电池的极化现象,因此,可以根据端电压回升现象确认参数 R_b 和 C_b 。可以认为HPPC试验的静置阶段,RC回路两端电压 U_b 为

零输入响应,即 U_b 和端电压 U 可以表示为

$$U_b = U_b(0)e^{(-t/\tau)} \quad (4)$$

$$U = U_o - U_b \quad (5)$$

式中, $U_b(0)$ 为静置时刻RC回路两端电压初值; U_o 为锂电池开路电压。开路电压 U_o 可以查询锂电池SoC-OCV曲线得到,端电压 U 为电池测量值。

(3) 极化电阻 R_b

HPPC试验过程中,由于HPPC单个试验脉冲开始之前,电池已经静置了很长时间,电池的极化效应已基本消失,因此,可以认为HPPC单个试验脉冲放电过程中的RC回路电压响应 U_b 为零状态响应。则RC回路两端电压 U_b 和电池端电压 U 可以表示为

$$U_b = R_b I(1 - \exp(-t/\tau)) \quad (6)$$

$$U = U_o - R_b I \quad (7)$$

开路电压 U_o 同样查询锂电池SoC-OCV曲线得到,欧姆内阻 R_1 和时间常数 τ 使用上一步骤计算结果,则通过拟合HPPC单个试验脉冲放电过程的电池端电压可得到极化电阻 R_b ,放电过程端电压拟合曲线如图4所示。

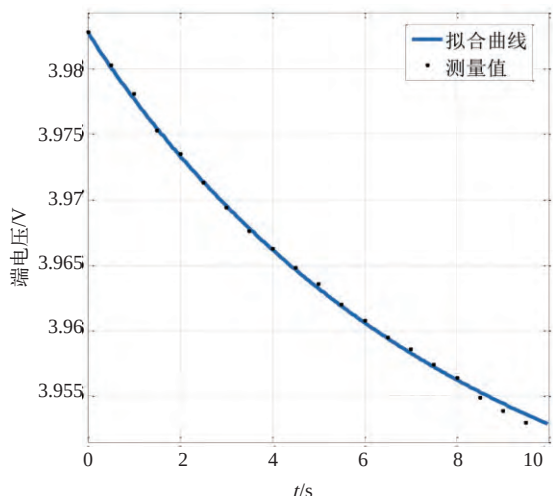


图4 放电过程端电压拟合曲线

由于极化电阻 R_b 和极化电容 C_b 与时间常数 τ 的关系,可由此得到极化电容 C_b 。极化电阻 R_b 和极化电容 C_b 与时间常数 τ 的关系式为

$$\tau = R_b C_b \quad (8)$$

根据上述计算步骤,可得到NMC电池Thevenin模型参数辨识结果如下表所示。

表 电动机与变压器匹配

参数	$R_1/m\Omega$	$R_b/m\Omega$	$C_b/\mu F$
大小	41.24	24.00	355.17

锂离子电池模型验证

以锂电池测量端电压为基准对模型进行验证。

首先,对Thevenin模型端电压计算式总结如下

$$U = U_o - R_1 I - U_b$$

$$U_b(k+1) = e^{(-\Delta/R_b C_b)} U_b(k) + R_b I(1 - e^{(-\Delta/R_b C_b)})$$

$$U_o = f(\text{SoC})$$

$$\text{SoC}(k+1) = \text{SoC}(k) - \frac{\eta}{C} I \quad (9)$$

根据Thevenin模型端电压计算式可在Matlab/Simulink中搭建Thevenin仿真模型,模型输入信号为验证工况的电流值,可以仿真得到该工况的端电压值。以HPPC工况试验数据对电池模型的准确性进行验证。HPPC单个试验脉冲下仿真端电压与真实端电压对比图如5所示。

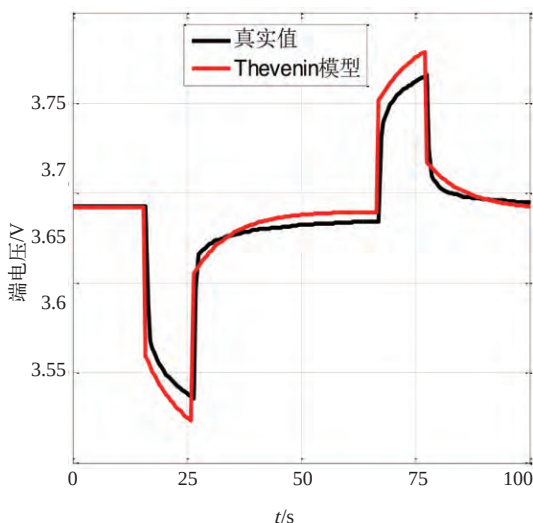


图5 HPPC单个试验脉冲下端电压仿真值与真实值

可以看出,Thevenin模型能较好地反映HPPC试验过程中锂离子电池真实端电压变化情况。且在整个HPPC试验过程中,Thevenin模型仿真得到的端电压与真实值对比,平均误差为0.004 0 V,最大误差为0.026 2 V,足以满足SoC估算过程对等效电路模型的要求。

结束语

选用Thevenin模型作为锂离子电池SoC估算的等效电路模型,采用最小二乘法在HPPC试验工况下对模型参数进行辨识,并选用端电压为基准在工况下进行验证。验证结果表明Thevenin模型可以真实地反映锂电池端电压变化规律,模型精度足以满足SoC估算对等效电路模型的要求,为锂电池其他相关内容研究奠定了基础。EA

(收稿日期:2016.09.09)

(编辑:杨得润)