锂电池组均衡充放电控制策略研究

梁波[1], 齐江江[2], 李玉忍[1], 王鹏[1]

(1.西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072;
2.中国人民解放军驻西安飞机工业公司军事代表室, 陕西 西安 710089)

摘 要:以电动汽车串联使用的锂电池组为研究对象,分析了电池组充放电过程中不一致性问题,综合电池模型原理和适用场合,选用二阶 Thevenin 等效电路模型搭建电池模型,运用曲线拟合的方法对电池模型参数辨识。设计了基于 DC-DC 变换器的外电压均衡控制策略原理,搭建仿真电路验证均衡电路性能。仿真结果表明,基于 DC-DC 变换器的外电压均衡控制策略可以很好地改善串联电池组充电和放电过程中的不一致问题。

关 键 词:Thevenin 模型;DC/DC 变换器;电池组均衡;MATLAB
中图分类号:TM34 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-2758(2017)04-0704-07

随着全球能源危机加深,石油资源日益枯竭,燃油汽车作为能源的一大消耗者,其发展受到了制约。同时,随着燃油汽车的使用,大气污染加重,全球气温上升,导致环境恶化。电动汽车具有无尾气排放、环保、噪声低、热效率高等优点,将成为未来汽车产业发展的主要方向。

锂离子电池[1-4]因为具有电压高、充放电效率高、自放电率低、无污染、无记忆效应、寿命长等优点,适合作为电动汽车的动力源。为了满足电动汽车的性能要求,往往由串联成组的电池组提供车载能量。

动力锂电池组由于不一致性问题的存在,在可用容量、使用寿命等方面远不及单体电池,不一致性作为整个电池组使用性能的决定性因素,影响到电动汽车的行程和驱动性能,以目前来看,解决不一致性问题的主要方法是对电池组进行均衡管理控制,所以电池组的均衡管理对成组使用的锂电池具有重要意义。

电池组均衡管理[5-6]的主要内容是检测电池组的参数,对其进行状态识别,在此基础上分析电池组的一致性,最终利用均衡电路对能量高的单体进行放电,对能量低的单体进行充电,使各单体电池状态趋于一致。通过有效的均衡控制策略和均衡电路改善电池组的一致性问题,不仅能够大幅提高动力电池组的整体性能,而且能够有效延长电池组的使用寿命,大大降低整车的使用和维护成本,促进相关技术的发展,使安全、高效、智能、实用的电动汽车的推广成为可能。

论文以串联使用的锂电池组为研究对象,分析了电池组充放电过程中不一致性问题,综合电池模型原理和适用场合,搭建基于二阶 Thevenin[7]等效电路的电池组模型,运用曲线拟合的方法对电池组模型参数辨识。采用基于 DC-DC 变换器的外电压均衡原理,搭建仿真电路验证均衡电路性能。仿真结果表明,基于 DC-DC 变换器[6]的外电压均衡可以很好地改善串联电池组充电和放电过程中的不一致问题。

1 锂电池 Thevenin 建模与参数辨识

1.1 锂电池 Thevenin 建模

锂电池 Thevenin 等效模型[7]综合考虑了电池特性与电容相似的特点,将 Rint 模型和阻抗谱模型相融合,更具有代表性。模型如图 1 所示,其中 U_{oc} 表示开路电压,是电池 SOC 的函数;R_o 表示电池欧姆内阻,实际电池中由电极材料、电解液、隔膜电阻

收稿日期:2017-02-23 **基金项目**:国家自然科学基金(11672240)和陕西省科学技术研究与发展计划(2016KE090042)资助
作者简介:梁波(1984—),西北工业大学讲师,主要从事电源变换技术、新能源发电及其应用研究。

及各部分零件的接触电阻组成;R_1 是电池的极化内阻,是电化学反应中由极化引起的电阻,包括电化学极化和浓度差极化引起的电阻,它与电容 C_1 并联成容阻回路,用于模拟电池极化产生和消除过程中表现出来的动态特性。由于 U_{oc} 为 SOC 的非线性函数,各 RC 为常数,故此模型为非线性模型。

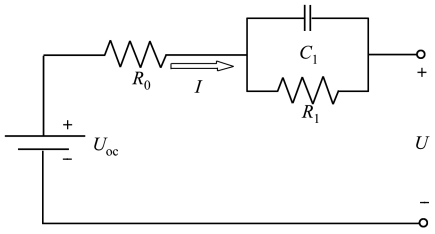


图 1　锂电池 Thevenin 等效电路模型

图 1 中状态方程可描述为

$$\begin{cases} U_1 = -\dfrac{U_1}{R_1 C_1} + \dfrac{i(t)}{C_1} \\ U = U_{oc} - U_1 - R_0 I \end{cases} \tag{1}$$

由此可见,Thevenin 等效电路模型不仅能够模拟电池的动态特性和静态特性,还可以处理非线性参数,理论上参数计算简单,也利于搭建状态空间模型。

1.2　模型参数辨识及验证

图 1 中并联 RC 电路的个数决定了模型的阶数,并联 RC 电路模拟的是电池的动态特性,即电流突变时电池电压的响应特性。对于不同类型的电池,模型阶数不同,RC 并联电路的参数也不同。模型阶数越高,预测精度越高,模型误差越小,但同时模型复杂度也增加。论文针对二阶 Thevenin 等效电路展开分析研究。

与(1)式类似,二阶 Thevenin 等效电路可描述为

$$u(t) = U_{oc}(SOC) + U_1(t) + U_2(t) + R_0 i(t) \tag{2}$$

$$U_1(t) = \begin{cases} R_1 i(t)(1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau_1}}) & t \leqslant t_d \\ U_1(t_d)\mathrm{e}^{-\frac{t-t_d}{\tau_1}} & t_d \leqslant t \leqslant t_s \end{cases} \tag{3}$$

$$U_2(t) = \begin{cases} R_2 i(t)(1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau_2}}) & t \leqslant t_d \\ U_2(t_d)\mathrm{e}^{-\frac{t-t_d}{\tau_2}} & t_d \leqslant t \leqslant t_s \end{cases} \tag{4}$$

(2)~(4)式中,t_d 为放电结束的时刻,即放电电流卸载时刻;t_s 为电池再次达到平衡状态时间;$\tau_1 = R_1 C_1$,$\tau_2 = R_2 C_2$。

采用脉冲放电实验[3] 对二阶 Thevenin 等效电路参数进行辨识,在电流卸载之前,(2)式中 $U_{oc}(SOC)$、$u(t)$、$R_0 i(t)$ 已知,故 $t < t_d$ 时有

$$U_1(t) + U_2(t) = (R_1 + R_2)i(t) - R_1 i(t)\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau_1}} - R_2 i(t)\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau_2}} = u(t) - U_{oc}(SOC) - U_O \tag{5}$$

脉冲放电实验中,放电电流为 6.5A,放电时间为 0~150 s,之后为电池回复时间,如图 2 所示。

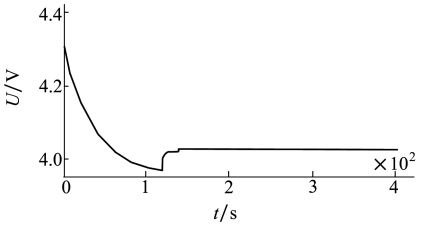


图 2　脉冲放电实验结果

图 2 中,可计算得到

$$R_0 = \frac{U_0}{I} = \frac{0.037}{6.5} = 0.005\ 692\ 3\ \Omega$$

利用最小二乘法对式(5)进行拟合得二阶 Thevenin 等效电路参数如表 1 所示。

表 1　二阶 Thevenin 等效电路参数辨识结果

参数	拟合结果
R_0/Ω	5.692×10^{-3}
R_1/Ω	0.003
C_1/F	0.001
R_2/Ω	4 000
C_2/F	2 000

测试在不同 SOC 时,对所建立的二阶 Thevenin 等效电路模型进行验证。电流为 6.5A,分 10 次将电池从 SOC% = 100 降至电压等于截止电压处,每个周期放电持续 80% 的时间,静置 20% 的时间,仿真结果如图 3 所示。

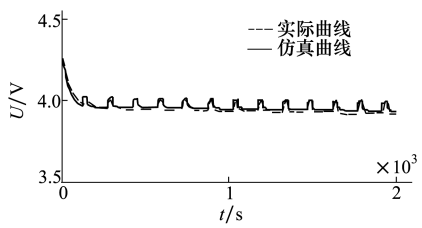


图 3　二阶 Thevenin 电池模型电压与实际电压曲线

图 4 中,二阶 Thevenin 电池模型电压与电池实际输出电压之间的误差小于 5%,模型具有良好的动静态性能,可以模拟实际电池。

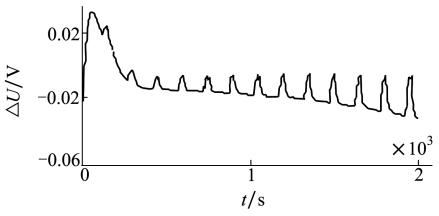


图 4 电压误差曲线

2 均衡充放电策略

2.1 主电路拓扑结构

均衡拓扑结构如图 5 所示,它是基于 DC/DC 变换器的外电压均衡拓扑结构,属于非耗散型均衡,主要元件包含开关管 M_i、二极管 D_i(i = 1,2,3,4,5,6,7,8) 和电感 L。

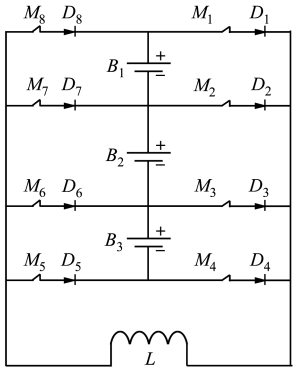


图 5 均衡主电路拓扑结构

图 5 中,每个电池与上下 4 个开关管连接,通过控制开关管的通断来改变电流通路,从而实现电池的充、放电,所以开关管的控制是均衡过程主要的部分。二极管的作用是限制电流的流向,使电流只能向 1 个方向流动,从而避免电池短路。例如:电池 B_1 和 B_2 同时放电时,M_1、M_2、M_6、M_7 均打开,若没有二极管,则 B_1 会由经 M_1、M_2 的电流短路,B_2 由经 M_6、M_7 的电流短路。添加二极管后,电流只能向右流动,电池不会被短路。电感的作用是储存和释放电能,均衡过程由 2 部分组成:① 电量较高的电池放电、给电感充电的过程,本文中称为充电过程;② 电感放电、给电量较低的电池放电的过程,称为放电过程。2 个过程交替进行,即可实现电池电量的均衡。

对于图 5 中单个电池而言,与其相连的有 4 个开关管和电感,当电池电压较高时,M_1、M_3 开通,电流依次通过 Battery、M_1、D_1、L、M_3、D_3 形成回路,电池放电,电感充电,即充电过程,如图 6a) 所示。当电池电压较低时,控制 M_2、M_4 开通,电流依次通过 Battery、M_2、D_2、L、M_4、D_4 形成回路,电感放电,电池充电,即放电过程,如图 6b) 所示。

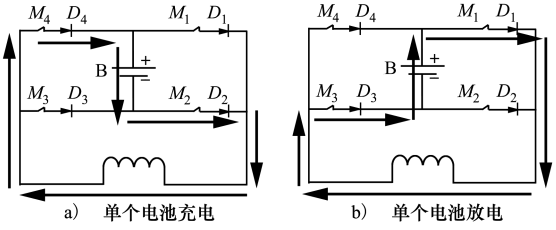


图 6 单个电池充放电原理

2.2 控制策略

电压比较的目的是选出最小或最大电压,电压高的电池放电,将电量通过电感转移给电压最低的电池。当出现电压相等时,3 节电池即 3 个电压输入,两两比较可得 6 个输出:U_{12}、U_{21}、U_{23}、U_{32}、U_{13}、U_{31},U_{12} = 1 代表 $U_1 > U_2$,U_{21} = 1 代表 $U_2 > U_1$,其他同理。

表 2 电压比较模块逻辑设计

含义	y_{11}	y_{22}	y_{33}
均衡	0	0	0
U_1 最小	0	1	1
U_2 最小	1	0	1
U_3 最小	1	1	0
$U_1 = U_2 < U_3$	0	0	1
$U_1 = U_3 < U_2$	0	1	
$U_2 = U_3 < U_1$	1	0	0

当 $U_{21} = 0$ 且 $U_{31} = 0$ 时,$U_1 < U_2$ 且 $U_1 < U_3$,即 U_1 为最小电压,所以给 U_{21} 和 U_{31} 取或关系时,用输出为“1” 时表示 U_1 是最小电压,将 U_{12} 和 U_{13} 取或关系,即 $y_{11} = U_{12} + U_{13}$,则 y_{11} = 1 代表 U_1 并非最小电压,y_{22}、y_{33} 同理。则 y_{11}、y_{22}、y_{33} 取值的组合代表了不同情况下电压的大小。

根据表 2 中 7 种不同工作状态,写出开关管表达式及真值表。

$$\begin{cases} g_1 = (y_2 + y_3 + y_6) \cdot y \\ g_2 = y_1 + y \cdot y_3 + \bar{y} \cdot y_4 + y_5 \\ g_3 = y_1 \cdot y + y_2 + y_4 + y_6 \cdot \bar{y} \\ g_4 = (y_3 + y_5 + y_6) \cdot \bar{y} \\ g_5 = (y_1 + y_2 + y_4) \cdot \bar{y} \\ g_6 = y_1 \cdot y + y_3 + y_5 + y_6 \cdot \bar{y} \\ g_7 = y_2 + y_3 \cdot y + y_4 \cdot \bar{y} + y_6 \\ g_8 = (y_1 + y_4 + y_5) \cdot \bar{y} \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} y_1 = \overline{y_{11}} \cdot y_{22} \cdot y_{33} \\ y_2 = y_{11} \cdot \overline{y_{22}} \cdot y_{33} \\ y_3 = y_{11} \cdot y_{22} \cdot \overline{y_{33}} \\ y_4 = \overline{y_{11}} \cdot \overline{y_{22}} \cdot y_{33} \\ y_5 = \overline{y_{11}} \cdot y_{22} \cdot \overline{y_{33}} \\ y_6 = y_{11} \cdot \overline{y_{22}} \cdot \overline{y_{33}} \end{cases} \tag{7}$$

表 3　控制信号逻辑真值表

y_{11}	y_{22}	y_{33}	y	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0
0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1
1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0
1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0
1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1
0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0
1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0

公式(6)中,y 表示电感的充、放电状态为:$y = 1$ 时,电感充电;$y = 0$ 时,电感放电。$g_i(i = 1,2,3,4,5,6,7,8)$ 表示开关管 M_i 的状态。

3　仿真分析

在 MATLAB/Simulink 环境中,设定 Battery 模型参数为 3.6 V、2 Ah 锂电池,电感值选用 0.01 H,受控电流源信号取 2 A,即 1C 电流,改变受控源的连接方式,即可实现电池的充、放电过程转换。3 节电池分别取不同的初始剩余电量,可以模拟一致性不同的 3 节电池。仿真中取 B_1 的初始电量为 75%,B_2 初始剩余电量为 70%,B_3 初始剩余电量为 55%。

3.1　电池充电过程仿真

图 7 为用 1C 电流给电池组充电的过程中电池 SOC 值随时间的变化。由图 7 可知,在 3 200 s 时刻以后,3 块电池 SOC 基本一致,故可认为电池组进入了均衡状态,此时 3 节串联电池基本上是一起充电的状态。

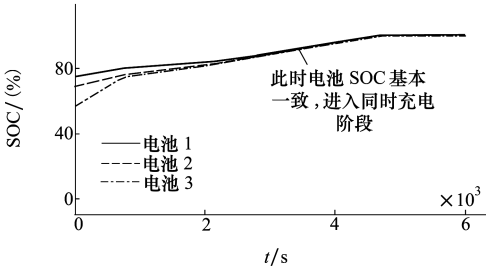


图 7　1C 充电电池 SOC%

图 8 为用 1C 电流给电池组充电的过程中电池电压随时间的变化。

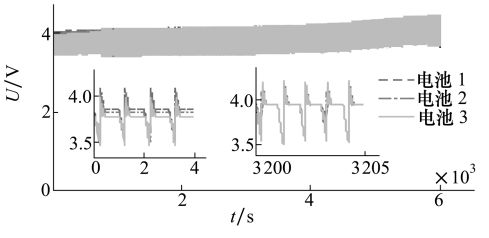
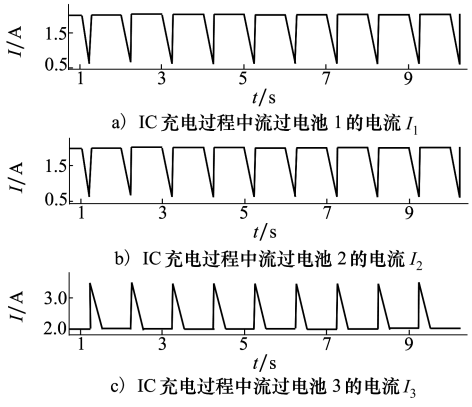


图 8　1C 电池充电电压

由图可以看出,充电开始时,3 节电池由于初始剩余容量不同,所以开始放电时的电压有较大差距。而在 3 200 s 时刻,3 节电池电压波形基本重合,说明均衡电路发挥了作用,实现了电压的一致,而且均衡效果较好。

图 9 所示为 1C 充电过程中,通过电池的电流波形局部放大图。开关管开通期间,B_1、B_2 放电,产生与充电电流相反、数值略小于充电电流 2 A 的放电电流,给电感充电,之后开关管关断,通过电池 B_1、B_2 的电流恢复至 2 A。开关管关断期间,电感释放储存的能量,给 B_3 充电,通过 B_3 的电流上升,电感放电完成后,通过 B_3 的电流恢复至 2 A。



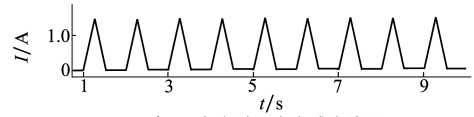
a) IC 充电过程中流过电池 1 的电流 I_1

b) IC 充电过程中流过电池 2 的电流 I_2

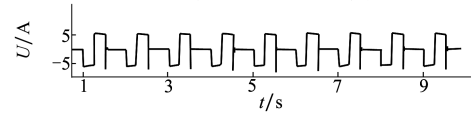
c) IC 充电过程中流过电池 3 的电流 I_3

图 9 1C 充电电流局部放大图

图 10 所示为充电过程中流过电感的电流及电感两端的电压波形局部图。开关管开通期间,电感充电,通过电感的电流不断增大,电感两端产生电压,电压的正负取决于电路中电感极性的设置,由波形可看出,电感充电时其两端电压为负且基本保持不变。开关管关断时,B_1、B_2 停止给电感放电,而电感电流不能突变,所以电感电压极性突变,电感放电,电流方向不变,电池 B_3 充电,随着电感电量的减少,电感发出的电流不断减小,通过电感电流减小为零时,电感放电过程结束。



a) IC 充电过程中电感电流图



b) IC 充电过程中电感电压图

图 10 1C 充电电感电流及电感电压局部图

3.2 电池放电过程仿真

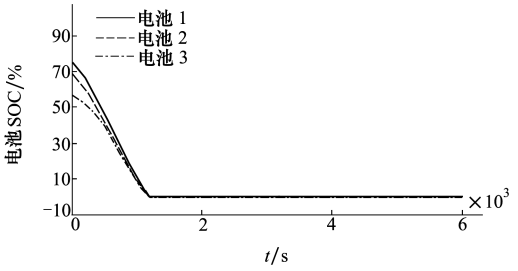


图 11 1C 放电电池 SOC%

图 11 为放电过程中电池 SOC 值随时间的变化。由于电池的 SOC 可以作为电池一致性的判定标准,且由图 12 可知,在 1 100 s 左右,电池 SOC 基本一致,故可认为电池组进入了均衡状态,此时 3 节串联电池基本上是一起呈 2 A 电流放电的状态。

由 12 图可以看出,放电开始时,3 节电池由于初始剩余容量不同,所以开始放电时的电压有较大差距。而在 1 300 s 左右,3 节电池电压波形基本重合,说明均衡电路发挥了作用,实现了电压的一致,而且均衡效果较好。

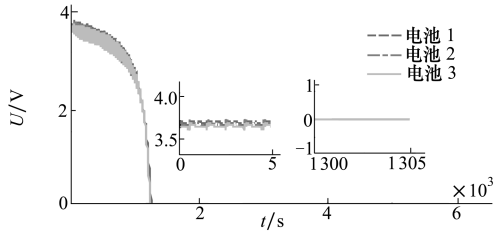
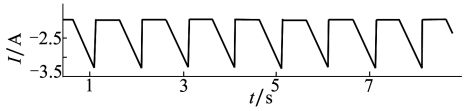


图 12 1C 放电电池电压波形

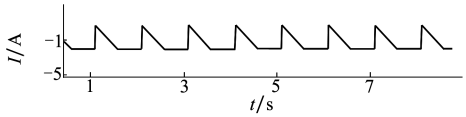
图 13 所示为用 1C 电流对电池放电的过程中,通过电池的电流波形细节图。开关管开通期间,



a) IC 放电过程中流过电池 1 的电流 I_1



b) IC 放电过程中流过电池 2 的电流 I_2



c) IC 放电过程中流过电池 3 的电流 I_3

图 13 1C 放电电池电流局部图

B_1、B_2 放电,产生与充电电流相反、数值略小于充电电流 2 A 的放电电流,给电感充电,之后开关管关断,通过电池 B_1、B_2 的电流恢复至 2 A。开关管关断期间,电感释放储存的能量,给 B_3 充电,通过 B_3 的电流上升,电感放电完成后,通过 B_3 的电流恢复至-2 A。

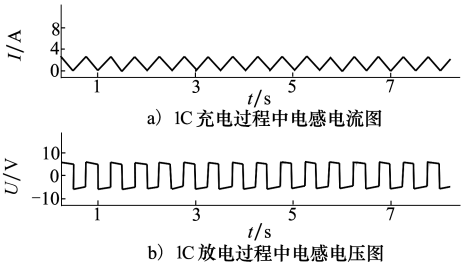


图 14　1C 放电通过电感的电流及电感两端电压

图 14 所示为用 1C 电流对电池放电的过程中流过电感的电流及电感两端的电压波形细节图,开关管开通期间,电感充电,通过电感的电流不断增大,电感两端产生电压,电压的正负取决于电路中电感极性的设置,由波形可看出,电感充电时其两端电压为负且基本保持不变。

开关管关断时,B_1、B_2 停止给电感放电,而电感电流不能突变,所以电感电压极性突变,电感放电,电流方向不变,电池 B3 充电,随着电感电量的减少,电感发出的电流不断减小,通过电感电流减小为零时,电感放电过程结束。

4　结　论

论文阐述了二阶 Thevenin 模型的工作原理及参数辨识方法,运用最小二乘法拟合 SOC 与开路电压的关系曲线,得到开路电压与 SOC 表达式,根据脉冲放电实验确定的 RC 参数,搭建了基于软件平台 MATLAB 的仿真模型电路验证电池模型。

设计了基于 DC-DC 变换器的外电压均衡原理以及电路设计分析,通过电压比较判断电路状态,分情况讨论每种状态下控制电路的工作模式,列写逻辑表达式,通过仿真分析,证明了锂电池组均衡充放电控制侧在电池组块充、放电过程可以较好地改善均衡过程中的单体电池不一致性,均衡完成后,单体电池间差异很小,避免了循环使用过程中电池单体不一致性增大的问题。

参考文献:

[1] 刘希闻. 电动汽车锂离子电池模型仿真与 SOH 研究[D].长春: 吉林大学,2014
Liu Xiwen. The Estimating of Lithium-Ion Battery Model and SOH of Electric Vehicle[D]. Changchun, Jilin University, 2014 (in Chinese)

[2] 许爽,孙冬,柳钦煌. 一种锂电池组无损均衡管理系统设计[J]. 电子器件,2014,37(4):799-802
Xu Shuang, Sun Dong, Liu Qinhuang. A Novel Scheme of Non-Dissipative Equalization Management System for Lithium Battery Pack[J]. Chines Journal of Electron Device, 2014,37(4): 799-802 (in Chinese)

[3] 杨帆. 锂离子电池管理系统的设计与实现[D]. 杭州:浙江大学,2015
Yang Fan. Design and Implementation of Lithium Battery Management System[D]. Hangzhou, Zhejiang University, 2015 (in Chinese)

[4] 孙朝. 锂电池组均衡充电与管理系统设计[D]. 重庆:重庆大学,2013
Sun Zhao. Design of Li-Battery Charging Equalization and Management System[D]. Chongqing, Chongqing University, 2013 (in Chinese)

[5] Ahmed Fasih. Modeling and Fault Diagnosis of Automotive Lead Acid Batteries[D]. Ohio State University Columbus, USA, 2006

[6] Yarlagadda S, Hartley T T, Husain I. A Battery Management System Using an Active Charge Equalization Technique Based on a DC/DC Converter Topology[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2013, 49(6): 2720-2729

[7] 谢旺. 基于 Thevenin 等效电路模型的锂离子电池组 SOC 估算研究[D].上海:上海交通大学,2013
Xie Wang. Study on SOC Estimation of Lithium-ion Battery Module Based on Thevenin Equivalent Circuit Model[D]. Shanghai, Shanghai Jiaotong University, 2013 (in Chinese)

[8] Shuo Tian, Munan Hong, Minggao Ouyang. An Experimental Study and Nonlinear Modeling of Discharge *I-V* Behavior of Valve-Regulated Lead-Acid Batteries[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2009(6): 452-458

Study on Control Strategy of Charge and Discharge for Lithium Battery Series

Liang Bo[1], Qi Jiangjiang[2], Li Yuren[1], Wang Peng[1]

(1.School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.PLA Military Representative Office in Xi'an Aircraft Industry Corporation, Xi'an710089, China)

Abstract: This paper use series lithium battery series of the electric vehicles as research object. Analyzed the consistency charging and discharging process of the battery. The battery model is using second-order Thevenin circuit based on the principle of battery model and application of occasions. Carried on the parameters identification using the curve fitting method, completed the battery model verification. After that, the external voltage equalization based on the DC-DC converter is used to build the simulation circuit to verify the performance of the equalization circuit. The simulation results show that the control strategy can improve the series battery charging and discharging process.

Keywords: Thevenin model; DC-DC converter; battery series equalization; MATLAB