

基于 SOC 的锂动力电池多层双向自均衡方法

熊永华^{1,2}, 杨 艳^{1,2}, 李 浩^{1,2}, 何 勇^{1,2}, 吴 敏^{1,2}

(1. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 先进控制与智能自动化湖南省工程实验室, 湖南长沙 410083)

摘 要: 电池均衡是优化动力电池性能, 提高使用寿命, 增强动态工作过程安全性的一项关键技术. 针对锂动力电池单体数量多, 测量与控制数据量庞大等问题, 本文将锂动力电池分为区域模块和全局模块两层, 进而提出一种融合区域均衡与全局均衡的多层次协调均衡方法. 通过开关电容区域均衡电路与反激式变压器全局均衡电路控制充放电过程的开关通断, 实现双向均衡目标; 在此基础上, 考虑不同电池荷电状态(State of Charge, SOC)分布情况下锂电池的受电能力差异, 以多模式充电策略为均衡前提条件, 使用 SOC 关键参数作为均衡判据, 实现系统充电与非充电过程的主动双向自均衡. 实验结果表明, 所提出的双向自均衡方法能实现高精度的均衡目标, 且能耗较低.

关键词: 电池均衡; 均衡判据; 荷电状态; 锂动力电池

中图分类号: TM91 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)04-0766-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.04.022

Multi-Level Bi-Directional Active Equalization Method in Lithium-Ion Power Battery Based on State-of-Charge

XIONG Yong-hua^{1,2}, YANG Yan^{1,2}, LI Hao^{1,2}, HE Yong^{1,2}, WU Min^{1,2}

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. Hunan Engineering Laboratory for Advanced Control and Intelligent Automation, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: Battery equalization is a key technology for improving the battery life, enhancing the security and optimizing the performance. Due to the reason of too many cell numbers and huge data in measure and control, this paper proposes a coordinated control method for regional and global equalization based on double-level structure in lithium-ion battery. Then two circuits are adopted to control the state of switch in the process of charge and discharge to archive the target of bi-directional equalization, which are switch capacitor area equalization circuit and the fly-back transformer global equalization circuit. At the same time, based on the discrepancy of efficiency among the different SOC distribution, the multimodal charging strategy are applied as the key parameters of SOC criterion to realize the autonomic equalization in the process of charge and discharge. The experimental results show that the multi-level coordination equalization method proposed in this paper can realize the goal of high-precision equalization, which is of good performance in equalization and low energy consumption.

Key words: battery equalization; equalization criterion; state of charge; lithium-ion power battery

1 引言

动力电池直接影响电动汽车工况性能, 但锂动力电池存在单体电压小, 对温度、过流与过压敏感等缺陷, 使得检测难度高, 易损坏, 安全隐患大. 为解决锂动力电池由于充放电过程中容量不一致导致电池过充, 过放等因素造成的性能差、寿命低等问题, 电池均衡技术至关重要^[1,2].

针对动力电池均衡方法, 国内外进行了深入研究与

工程实践. 主要分为两类: 耗散法和非耗散法. 耗散法通过电阻消耗掉高出的电量以实现均衡. 该方法控制简单, 但能耗大, 热排放困难; 非耗散法是通过电容或电感类的非耗能元件转移能量, 该方法可以弥补第一类方法的不足, 是当前的主流方法, 但控制相对复杂^[3]. 对于非耗散法, 近年来国内外提出了一些方案. 例如: 以碳基双电层电容器作为新的储能系统^[4]; 以开关控制旁路电容的开关电容法^[5], 与该方法类似的还有电感均衡法, 如 Buck-Boost 转换模型, Cuk 转换模型^[6]; 此类方法能耗

少,效率高,但由于电容与电感的时滞使得均衡频率受限,同时电容与电感需求量大.分散式直流变换法,如 DC-DC 变换器法^[7,8],可实现能量双向转换,损耗低,效率高,但造价高,并带来电磁兼容问题.多绕组变压器法是通过变压器绕组实现低电量电池在充电过程中吸收更多能量^[9,10],价格相对便宜,控制简单,但副边多导致模块设计与实现困难,且只用于充电过程单向均衡.非耗散型分流器法^[11]是通过有效分配充电电流实现充电速率差异的均衡方法,优点是能量转移路径跨度小且双向均衡,但只针对充电过程,控制策略复杂.

均衡判据是电池均衡方法中最关键参数,用于控制均衡电路的开闭状态^[12].文献[6~11]的判据主要为电压,在铅酸电池,镍氢电池中应用效果良好.但是,由于锂动力电池的单体数,温感性,非线性等问题,应用效果不佳.除电压判据外,部分学者提出电流判据,通过控制电流大小达到均衡目标^[13],此方法受电池充放电效率影响,同时不适用于包含多电池的锂动力电池;片上 LDO(Low-Dropout Regulator)系统^[14]也是一种面向负载电流的电源管理方法,但主要用于便携式弱电设备.

本文综合上述均衡方法的优缺点,提出以 SOC 为均衡判据,适用于锂动力电池的区域改进开关电容与多层反激式变压器全局均衡的双向自均衡方法,用以实现充电与非充电过程高效低能耗的均衡目标.

2 锂动力电池结构设计及充电方法

锂动力电池由大量单体锂电池组成,如电动汽车需求电压为 300V,一般锂电池电压为 3.5V~4.2V,因而单体电池数为 80 左右.为实现性能最大化,保障电池安全性与使用寿命,锂动力电池的结构设计对电池均衡至关重要.

针对上述分析,本文设计双层分布结构,并通过分析锂动力电池在不同 SOC 状态下的充电性能,进而设计三段式充电方法,有效提高能源利用率并降低充电时间.

2.1 双层锂动力电池分布式系统结构

为综合高效管理所有单体电池,本文建立包含区域模块与全局模块的锂动力电池双层分布式结构,图 1 为系统结构分布图.

区域模块一般以 5~8 个单体电池为一组,通过微处理器实现信息处理与分析以及模块控制.全局模块由大量区域模块与中央控制器(Electronic Control Unit, ECU)组成,ECU 用于区域与全局模块数据分析与管理.

电池均衡结构依据双层系统结构分为区域均衡与全局均衡模块.区域均衡模块电池数量有限,电压较小,控制相对简单;全局均衡模块电池组数量较多,电

压较大,均衡难度较大.

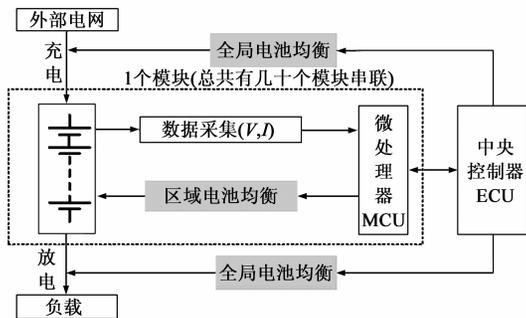


图1 系统结构分布图

2.2 锂动力电池充电策略

电池充电目标是在不损坏电池前提下获得最大能量并最大缩短充电时间.为缩短充电时间,充电过程应选择最大可接受电流.

为获得电流接受状况,本文建立二阶等效机理模型^[15],如图 2 所示,其中 C_b 为等效电容, R_i 为内阻, R_1 与 C_1 分别为极化电阻和电容, V 与 I 分别为负载电压与电流.

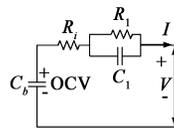


图2 改进二阶等效锂电池模型

依据安时法理论可得式(1)(2).

$$\frac{d \text{SOC}(t)}{dt} = -\frac{\eta i(t)}{C_N} \quad (1)$$

$$\frac{d \text{OCV}(t)}{dt} = -\frac{i(t)}{C_b} \quad (2)$$

其中, C_N 为额定容量, η 在理想情况下为电池库伦效率;实际过程中, η 还与电池老化等因素相关,主要表现在充放电效率,因此本文定义 η 为广义库伦效率,即库伦效率与充放电效率比值.

为验证电池在不同状态下的库伦效率.根据式(1)(2),可得式(3):

$$\frac{d \text{OCV}(t)}{d \text{SOC}(t)} = \frac{C_N}{\eta C_b} \Rightarrow \frac{d \text{OCV}(t)}{d \text{SOC}(t)} = k \propto \frac{1}{\eta} \quad (3)$$

根据开路电压(Open Circuit Voltage, OCV)法, OCV 与 SOC 呈如图 3 所示曲线关系,普通蓄电池呈线性关系,而锂电池受极化等非线性影响严重.设 k 为斜率.则根据式(3)可知. η 与 k 成反比,因此电池 SOC 在 SOC_{T_1} 与 SOC_{T_2} 之间时 η 最高.依据 η 的物理定义,如式(4)所示,其中 $I_{\text{理论}}$ 与 $I_{\text{实际}}$ 分别为电池标定与实际接收的最大电流.

$$\eta = \frac{I_{\text{实际}}}{I_{\text{理论}}} \quad (4)$$

依据图3所示,电池充电过程以 SOC_{T_1} 和 SOC_{T_2} 为界分为三段.段I,电池容量极低, η 非常小,此时大电流会损坏电池机理,因此,此段充电过程必须为低电流;段II,电池电压迅速上升, η 最大且接近1,此时电池可接受电流最大;段III,电池基本充满,但内部仍然有少量 Li^+ 移动,此时大电流会损坏电池机理且能耗大,为此本段不宜大电流输入.依据上述分析,本文采用预充电-恒流-恒压的三段充电方法,如图4所示.

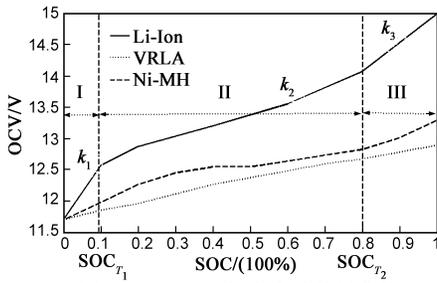


图3 OCV-SOC标定实验结果曲线

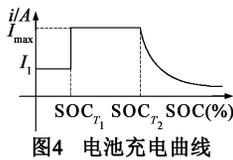


图4 电池充电曲线

图4中, I_{max} 为最大可接受电流即第II段电流, I_1 为第I段最大可接受电流, k_1 与 k_2 分别为两段斜率,据式(3)(4)得 I_1 与 I_{max} 关系如下所示:

$$\frac{I_1}{I_{max}} = \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{k_2}{k_1} \Rightarrow I_1 = \frac{k_2}{k_1} \times I_{max} \quad (5)$$

第III段电池趋于饱和,电池需要浮充以激活锂离子最大限度的向正极移动,为防止过压,采用恒压充电,此时电流呈现如下所示的马斯曲线:

$$i(t) = I_{max} e^{-at} \quad (6)$$

其中, $a = \frac{k_3}{k_2}$ 为充电接受率, k_3 为第III段斜率.

以上充电方法在SOC不同区间段,电池均衡方法将针对SOC区间分布情况进行针对性控制.

3 锂动力电池均衡方法

电池均衡主要针对电池充电与非充电过程均衡.本文基于锂动力电池双层结构,提出基于SOC的多层次锂动力电池双向自均衡方法.

3.1 锂动力电池双向自均衡电路

针对图1所示锂动力电池系统结构,电池均衡电路设计为区域均衡电路与全局均衡电路.

由于区域模块单体电压小,数量少,干扰小,本文采用电容区域均衡电路.如图5所示.

设定 $V_{B_i} > V_{B_j}$,则均衡过程为 B_i 向 B_j 传递能量.传

递过程包括:(1)放电导通充电截止时, B_i 向电容 C 充电;(2)充电截止放电导通时, C 向 B_j 放电.为防止电容因电流突然过程产生瞬间脉冲,在电路中加入电阻 R .通断开关选择外接二极管的金属氧化物半导体场效应晶体管(Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET)可双向导通且防止电流倒流等.

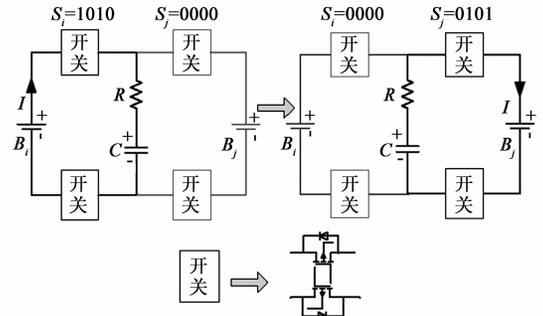


图5 区域均衡方法实现过程示意图

如图6所示为区域均衡总接线图,每个电池均衡状态由四位高低电平控制,奇数位同高则正向导通,偶数位同高则反向导通,所有位同低则截止.所有信号由微处理器给定, I 为充电电流.

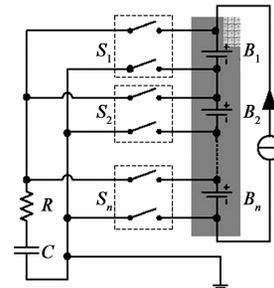


图6 区域均衡电路

针对全局模块电池组存在电压大,电池组数量多等问题,本文设计基于反激变压器式全局均衡电路,如图7所示.当 $Q_i = 1010$ 时,开关正向导通,电池组 i 向变压器充电,电流突变促使变压器产生感应电动势.同理,当 $Q_j = 0101$ 时,开关反向导通,副边电动势向电池组 j 充电.变压器在传递能量的同时可以有效实现电池组之间电气隔离,减小电池兼容影响.变压器两端电容用于储存能量并吸收高频电流干扰信号.

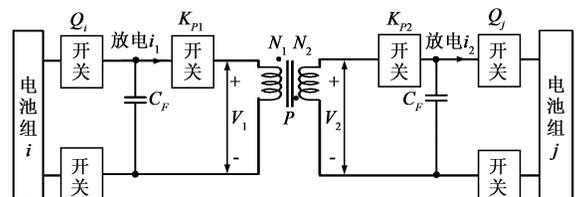


图7 全局均衡方法实现过程

在锂动力电池均衡设计过程中,由于动力电池电

压要求比较高导致电池组数量多,而逐一对电池组均衡将延长均衡时间,加入数量较多的均衡设备将增加成本与体积.因此,本文综合考虑设计多层均衡结构,如图 8 所示.

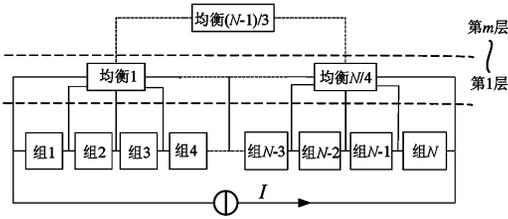


图8 全局均衡电路分布图

设定电池组数为 N ,设计以四个电池组为一个单元,余数为一个单元.以 4 的倍数为例,电池均衡电路层数 $m = \log_4 N$,均衡模块数为 $(N - 1)/3$.均衡过程从第一层到第 m 层依次均衡,开关 K 决定均衡电路的通断状态.

3.2 多层次协调控制均衡方法

3.2.1 基于 SOC 的均衡判据

电池均衡是为最大限度利用电池能量同时避免电池出现过充过放等状况造成永久性损坏.因此电池均衡的目标是消除电池差异,主要为储能差异.本文在基于电压均衡的基础上进行改进,分析电池电压与 SOC 的对应关系,通过控制开关脉宽调制(Pulse-Width Modulation, PWM)信号实现电池充电与非充电过程的双向自均衡,如图 9 所示为均衡方法流程图,主要包括两部分:一是 SOC 模块;二是均衡模块.

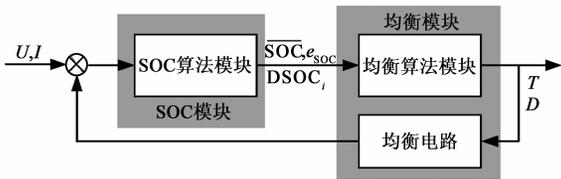


图9 基于SOC的均衡方法流程图

SOC 模块通过检测电流与电压获得 SOC 参数值,为均衡算法模块提供均衡过程重要参数判据.在锂动力电池工作过程的复杂工况下,锂电池内部参数如内阻、电动势、SOC 值、容量、效率等受电池劣化程度、自放电率、温度、充放电电流等内部化学参数与外部寄生参数影响,而准确 SOC 值是在上述多方参数影响下最具价值的评估参数.为此,本文提出基于高精度 SOC 的均衡策略,将各类影响参数,如寄生参数等,控制在 SOC 算法模块内以有效限制影响参数对均衡过程的影响. SOC 模块主要包括电池模型的建立、电池模型参数的实时辨识、SOC 的高精度估算几个部分.其中,电池模型采用的是如图 2 所示的改进电池模型,为了使该模型具有

在复杂多工况下各类内外参数的高鲁棒性,模型参数采用基于带遗忘因子的最小二乘模型参数在线辨识方法,最后通过改进卡尔曼滤波 SOC 估算方法得到高精度的 SOC 值;这一 SOC 估算方法的具体实现过程参考文献[15].

均衡算法模块通过均衡策略分析各电池的储能状况,并为均衡电路提供实时有效的 PWM 信号.

基于 SOC 均衡参数主要包括:平均值 $\overline{\text{SOC}}$,均方差 ϵ_{SOC} 以及电池 i 与 j 之间的偏差 ΔSOC_{ij} ,以 n 个电池为一组,三个参数的详细定义如下:

$$\overline{\text{SOC}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{SOC}_i$$

$$\epsilon_{\text{SOC}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{SOC}_i - \overline{\text{SOC}})^2}$$

$$\Delta\text{SOC}_{ij} = |\text{SOC}_i - \text{SOC}_j|$$

PWM 信号周期 T 与占空比 D 定义如下所示:

$$T = t_{m_1} + t_{m_2}$$

$$D = \frac{t_{m_1}}{t_{m_1} + t_{m_2}} \times 100\%$$

其中, t_{m_1} , t_{m_2} 分别为电容一次充电与放电时间.

分析均衡开闭条件主要由两个均衡判据参数决定,即:均方差满足: $\epsilon_{\text{SOC}} < \gamma$, SOC 偏差满足: $|\Delta\text{SOC}_{ij}| < \eta$.

以上均衡方法须以获得高精度 SOC 估计值为前提,依据文献[15]研究成果基于改进卡尔曼滤波 SOC 估算方法可实现高精度 SOC 估算目标.

为评估该电池均衡方法的能量损耗,本文建立能耗率参数 k ,以两个电池为例, k 定义如下:

$$k = \frac{2\text{SOC}_{\text{last}}}{\text{SOC}_1 + \text{SOC}_2} \times 100\%$$

其中, SOC_1 与 SOC_2 分别为电池初始 SOC, SOC_{last} 为均衡后的 SOC.

3.2.2 充电过程均衡条件

依据 2.2 节分析结果,充电过程电流高低与 SOC 区间分布直接相关,因此均衡开启条件随 SOC 区间分布不同而存在差异.

针对图 3 进行分析,设定 SOC 分布在 SOC_{\min} 与 SOC_{\max} 之间.则充电过程 SOC 区间分布状况有六种,对应情况下的均衡开闭条件如下所示:

$$(1) \quad 0 \leq \text{SOC}_{\min} < \text{SOC}_{\max} < \text{SOC}_{T_1}$$

$I = I_1$, SOC 差异比较小,无需均衡.当 $|\text{SOC}_{T_1} - \text{SOC}_{\min}| < \eta$ 时, I 转为 I_{\max} ,变为状况(2);

$$(2) \quad \text{SOC}_{T_1} \leq \text{SOC}_{\min} < \text{SOC}_{\max} \leq \text{SOC}_{T_2}$$

$I = I_{\max}$,当 $|\text{SOC}_{T_2} - \text{SOC}_{\max}| \geq \eta$ 时,均衡开启,直

到 $|\text{SOC}_{T_2} - \text{SOC}_{\min}| < \eta$ 时,变为状况(3);

$$(3) \quad \text{SOC}_{T_2} \leq \text{SOC}_{\min} < \text{SOC}_{\max} \leq 1$$

恒压充电, SOC 差异较小,无需均衡;

$$(4) \quad 0 \leq \text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}_{T_1} \leq \text{SOC}_{\max} \leq \text{SOC}_{T_2}$$

$I = I_1$, 均衡开启,直至 SOC 平稳时判断区间;

$$(5) \quad \text{SOC}_{T_1} \leq \text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}_{T_2} \leq \text{SOC}_{\max} \leq 1$$

$I = I_1$, 均衡开启,直至 SOC 平稳时判断区间;

$$(6) \quad 0 \leq \text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}_{T_1} \leq \text{SOC}_{T_2} \leq \text{SOC}_{\max} \leq 1$$

$I = I_1$, 均衡开启,直至 SOC 平稳时判断区间.

3.2.3 区域均衡方法

区域均衡以电容为均衡设备,因此电容大小与均衡脉冲直接影响均衡效果,内阻影响能耗率.

电容充放电过程能量关系如式(7)所示:

$$W_C = \int_0^t u_c i d\xi = \frac{1}{2} C u_c^2(t) - \frac{1}{2} C u_0^2 \quad (7)$$

从上可知,一个周期内电容最大均衡电量为:

$$W_{C_{\max}} = \frac{1}{2} C u_{c_{\max}}^2 - \frac{1}{2} C u_0^2 \quad (8)$$

将 $W_{C_{\max}}$ 作为最小均衡单位,并将该值作为均衡临界值设定误差范围,依据电池最大容量为电池额定容量与库伦效率的乘积可得 η 满足如下公式:

$$\eta C_N = Q_{\max} = W_{C_{\max}} = \frac{1}{2} C u_{c_{\max}}^2 - \frac{1}{2} C u_0^2 \quad (9)$$

设定电容初始电压为 0,最大电压不高于两个电池中较大者,即 $u_{c_{\max}} \leq V_{B_i}$,得到电容如下:

$$C \geq \frac{2\eta C_N}{V_{B_i}^2} \quad (10)$$

由于电池容量不确定,且 SOC 区间分布为 $[0 \sim 1]$,此时均方误差最小值为 0,最大值为 1,以类似正态分布形式分布在 $[0 \sim 1]$,因此可得:

$$\varepsilon_{\text{SOC}} \sim N(0.5, 0.11^2)$$

根据正态分布定义, P 为 $[\mu - \text{SOC}_{T_1}, \mu + \text{SOC}_{T_2}]$ 区域内的面积大小, $\mu = \overline{\text{SOC}}$. 以充电过程均衡条件为例,当 $\text{SOC}_{T_1} = 10\%$, $\text{SOC}_{T_2} = 80\%$, 则 $P = 70\%$; 根据 $\varepsilon_{\text{SOC}} < \gamma$, 结合正态分布计算方法可求得 $\gamma = 0.0033$.

依据上述均衡判据,设定区域模块内单体电池量为 n, m 为均衡层次,区域均衡策略如下所示:

Step1 计算 $\text{SOC}_i, \overline{\text{SOC}}, \varepsilon_{\text{SOC}}$ 及均衡判据 η 与 γ ;

Step2 判定是否充电以及充电过程均衡开启条件,若均衡开启,获取 V, I 值,若未开启,跳转至 Step12;

Step3 判断 $\varepsilon_{\text{SOC}} < \gamma$, 成立则跳转至 Step12, 否则继续;

Step4 计算 $m = \log_2 n, t_{m_1}, t_{m_2}, D$; 令 $q = 1$;

Step5 SOC 从高到低排序 $\text{SOC}_1 \sim \text{SOC}_n$;

Step6 $j = 1$;

Step7 判断 $|\text{SOC}_j - \text{SOC}_{n+1-j}| < \eta$, 成立则跳转至 Step10, 否则继续;

Step8 $S_j \sim S_{j+q-1} = 1010$, 其他为 0000, 延时 t_{m_1} ;

Step9 令 $S_{n+1-j} \sim S_{n+1-j-q+1} = 0101$, 其他为 0000, 延时 t_{m_2} , 返回 Step7;

Step10 $j = j + q$; 判断 $j \leq \frac{n}{2} + 1$, 成立则返回至 Step7, 否则继续;

Step11 $q = q + 1$; 判断 $q < m$, 成立则返回至 Step5, 否则继续;

Step12 结束均衡.

3.2.4 全局均衡方法

全局均衡方法以变压器为均衡设备,在电池组充电与非充电状态下实现电池组之间能量均衡. 变压器参数设置与开关 PWM 脉冲信号直接影响均衡效果, 电容为电路储存能量并滤除高频电流, 与变压器内阻一起成为产生能耗的主要原因.

根据图 7 分析, 以理想变压器为例, 高能量电池组向低能量电池组传递能量过程满足磁通守恒, 表达式如下:

$$\Delta\varphi_+ = \frac{U_i}{N_1} t_{m_1}$$

$$\Delta\varphi_- = \frac{U_j}{N_2} t_{m_2}$$

$$\Delta\varphi_+ = \Delta\varphi_- \Rightarrow \frac{U_i}{U_j} = \frac{N_1 t_{m_2}}{N_2 t_{m_1}} \quad (11)$$

其中, N_1 与 N_2 分别为变压器原边与副边的匝数, 由于变压器两端电池组额定电压相同, 需求变压比率为 1, 即:

$$n = \frac{N_1}{N_2} = 1 \Rightarrow L_1 = L_2 = L \quad (12)$$

依据式(11), (12)可得如下关系:

$$\frac{U_i}{U_j} = \frac{D}{1-D} \quad (13)$$

根据变压器储能情况如下式所示:

$$W_L(t) = \frac{1}{2} L i^2(t) - \frac{1}{2} L i_0^2(t) \quad (14)$$

设定变压器初始电流为 0, 则变压器在一个能量传递周期内最大储能 $W_{L_{\max}}$ 为:

$$W_{L_{\max}} = \frac{1}{2} L i_{\max}^2 \quad (15)$$

以 $W_{L_{\max}}$ 为全局均衡最小单位设定均衡临界值, 即 $Q_{\max} = W_{L_{\max}}$, 得到判据 $\eta_{\text{全}}$ 满足下式:

$$\eta_{\text{全}} C_N = \frac{1}{2} L i_{\max}^2 \quad (16)$$

由于电池组电压最大不超过大容量电池均衡前电

压 V_i , 而电容端电流与电压的关系为: $i = \frac{1}{L} \int u dt$, 从而可得:

$$i_{\max} = \frac{1}{L} V_i \Delta T \quad (17)$$

ΔT 为采样周期, 设定为 1s, 由式(16)(17)可得:

$$L = \frac{V_i^2}{2n_{\text{全}} C_N} \quad (18)$$

类比局域均方差判据 γ 求值方法可得全局均方差判据 $\gamma_{\text{全}}$.

依据上述均衡判据, 设定一个全局模块内电池组数量为 N , m 为均衡层次, 可得全局均衡策略如下所示:

Step1 计算 $\text{SOC}_i, \overline{\text{SOC}}, \epsilon_{\text{SOC}}$ 及均衡判据 $\eta_{\text{全}}$ 与 $\gamma_{\text{全}}$;

Step2 判定是否充电以及充电过程均衡开启条件, 若均衡开启, 获取 V, I 值, 若未开启, 跳转至 Step13;

Step3 判断 $\epsilon_{\text{SOC}} < \gamma_{\text{全}}$, 成立则跳转至 Step13, 否则继续;

Step4 计算 $m = \log_4 N, t_{m_1}, t_{m_2}, D$; 令 $q = 1$;

Step5 第 q 层均衡模块开启, 及 $K_{\frac{n}{4^{q-1}+1}} \sim K_{\frac{n}{4}} =$

11, 其他为 0000;

Step6 SOC 从高到低排序 $\text{SOC}_1 \sim \text{SOC}_N$;

Step7 $j = 1$;

Step8 判断 $|\text{SOC}_j - \text{SOC}_{N+1-j}| < \eta_{\text{全}}$, 成立则跳转至 Step11, 否则继续;

Step9 令 $Q_j \sim Q_{j+q-1} = 1010$, 其他为 0000, 延时 t_{m_1} ;

Step10 令 $Q_{N+1-j} \sim Q_{N+1-j-q+1} = 0101$, 其他为 0000, 延时 t_{m_2} , 返回至 Step8;

Step11 $j = j + q$; 判断 $j \leq \frac{N}{2} + 1$, 成立则返回至 Step8, 否则继续;

Step12 $q = q + 1$; 判断 $q < m$, 成立则返回至 Step5, 否则继续;

Step13 结束均衡.

4 仿真实验结果

由于文献[15]已经使用了 Advisor(Advanced Vehicle Simulator)电动汽车仿真平台中的锂动力电池的相关数据对 SOC 模型进行了测试验证, 考虑该平台目前为研究者们所广泛使用, 平台的数据经过了大量的实物测试, 具有代表性, 所以可认为这些数据本身就是相关寄生参数的影响下所得到的. 因此, 本文直接运用 Matlab/SimPowerSystem 工具箱进行仿真实验, 在给定 SOC 的基础上进行均衡过程监控, 可以把各类外界寄生参数的影响排除在仿真之外, 从而验证均衡方法的理论

正确性. 实验内容包括区域均衡电路与全局均衡电路在充电与非充电状态下的电池 SOC 跟踪过程.

4.1 区域均衡实验

区域均衡实验以一组额定电压 3.6V, 额定容量 4Ah 的锂电池作为对象, 设计两组代表性实验. 分析选定均衡电容 C 为 100F, 均衡内阻 R 为 0.01Ω , $\gamma = 0.0033$.

实验 1 在电池处于充电状态时, 选定初始 $\text{SOC}_1 = \text{SOC}_3 = 70\%$ 与 $\text{SOC}_2 = \text{SOC}_4 = 10\%$ 的四个单体电池分别进行非均衡实验与均衡充电实验, 分析选定 $\eta = 0.5\%$, $T = 100, D = 50\%$. 图 10 为两组 SOC 对比图, 其中虚线为未加入均衡的充电过程曲线; 实线为加入均衡的充电过程曲线.

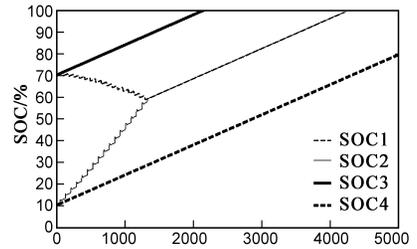


图10 区域充电过程均衡与非均衡对比结果

实验 2 在电池处于非充电(稳定)状态时, 选定初始容量 $\text{SOC}_1 = 100\%$, $\text{SOC}_2 = 20\%$, $\text{SOC}_3 = 90\%$, $\text{SOC}_4 = 50\%$ 的四个单体电池进行均衡实验. 分析设定 $\eta = 0.5\%$, $T = 40, D = 50\%$. 图 11 为区域多电池均衡结果.

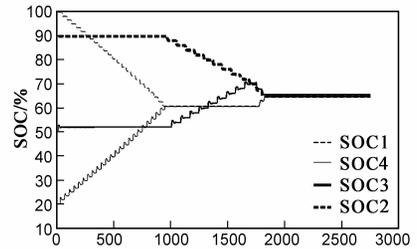


图11 区域多电池均衡结果

针对以上两组实验结果可知, 区域均衡方法能实现电池组内单体电池在充电与非充电状态下的均衡目标, 有效避免电池因 SOC 不均衡导致的部分电池过充过放等不利影响. 同时, 针对两组实验进行均衡能耗分析: 实验 1 结果显示, 在 SOC_3 达到充满状态时, $\text{SOC}_1 = \text{SOC}_2 = 70.5\%$, $\text{SOC}_4 = 39.9\%$, 计算可得此时加入均衡后的充电过程比未加入均衡时多储能 1%. 同时在 $T = 4250$ 时, 加入均衡后充电的两个电池已全部充满而未均衡充电的两个电池还在充电中, 因此实验 1 证明加入均衡电路后的充电过程将使电池在更短时间内充入更多能量; 依据实验 2 结果可得, $\text{SOC}_{\text{last}} = 64\%$, 从而推导能耗率 $k = 2.3\%$. 综合以上两组数据可知区域均衡电路效果良好, 能耗低.

4.2 全局均衡实验

全局均衡实验以 8 个单体锂电池串联而成的电池组为对象,额定电压为 28.93V,额定容量为 32Ah. 类比区域均衡实验,设计两组实验. 通过分析选定变压器 $L = 64000\text{H}$,内阻为 0.01Ω , $C_F = 100\text{F}$, $\gamma = 0.0033$.

实验 3 类比实验 1 设计全局均衡实验,选择 $\text{SOC}_1 = \text{SOC}_3 = 60\%$, $\text{SOC}_2 = \text{SOC}_4 = 20\%$, 分析设定 $\eta = 0.05\%$, $T = 100$, $D = 50\%$. 如图 12 所示为均衡充电过程与非均衡充电过程对比图,其中实线为均衡充电过程,虚线为非均衡充电过程.

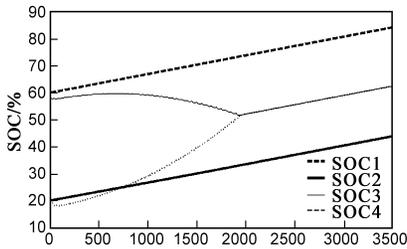


图12 充电过程均衡对比结果

实验 4 类比实验 2 的方法对四组电池组进行全局均衡实验. 选定初始容量 $\text{SOC}_1 = 90\%$, $\text{SOC}_2 = 10\%$, $\text{SOC}_3 = 80\%$, $\text{SOC}_4 = 20\%$, 分析设定 $\eta = 0.05\%$, $T = 50$, $D = 50\%$. 如图 13 所示为全局均衡过程 SOC 均衡结果.

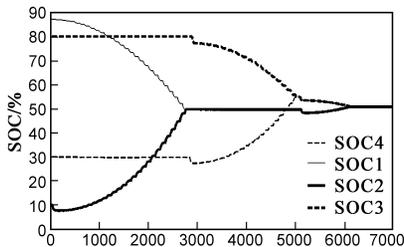


图13 全局多电池组均衡结果

针对以上两组实验结果分析可知,全局均衡方法能较好实现电池组在充电与非充电状态下的均衡目标,有效避免了电池组因 SOC 不均衡导致的部分电池组过充过放等不利影响. 同时,针对两组实验进行能耗分析可知:实验 3 仿真结果显示,在 $T = 3500$ 时, $\text{SOC}_1 = 83.62\%$, $\text{SOC}_2 = 43.25\%$, $\text{SOC}_3 = \text{SOC}_4 = 61.85\%$, 计算可得加入均衡的充电过程相比未加入均衡时的储能量在同时刻低 4.17%, 主要原因为初始时刻对变压器充电以及开关通断造成高频电流被滤掉导致部分能量亏损,但能耗亏损小,满足应用要求;依据实验 4 仿真结果可得, $\text{SOC}_{\text{last}} = 50.86\%$, 从而计算得到能耗率 $k = 3.1\%$. 从以上数据可知,全局均衡效果好,能耗比价低.

5 结论

针对锂动力电池因充放电过程电量不均而导致使

用寿命,安全性等性能变差问题,本文通过分析锂动力电池双层结构,提出一种基于 SOC 多层协调控制的双向自均衡方法. 该方法利用前期研究的 SOC 估算方法获得实时均衡判据;并通过三段式充电策略确定充电电流与均衡开闭状态关系;进而得到控制区域与全局均衡电路开关开闭的脉冲实现均衡控制. 仿真实验结果表明,基于 SOC 的多层次均衡方法在电池充电过程不消耗多余能量的前提下,大大缩短充电时间,约为单独充电最长与最短时间平均值;在非充电过程加入均衡后,电池在有限时间内实现高低电池能量自均衡,区域均衡能耗率为 2.3%,全局能耗率 3.1%. 均能实现高效均衡,均衡能耗低.

下一阶段的工作,将着手建立和完善电动汽车实物实验系统,该系统包括锂动力电池组、车架、负载电机、电机控制器、转矩传感器、功率分析仪、测功机、各类检测仪表、上位机以及 Labview 软件等,可以进行特定工况下的 SOC 估算、电池均衡等实物实验,从而为所提方法的工业应用打下基础.

参考文献

- [1] L G Lu, X B Han, J Q Li, J F Hua, M G Ouyang. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2013, 226(15): 272 - 288.
- [2] S H Park, K B Park, H S Kim, G W Moon, M J Youn. Single-magnetic cell-to-cell charge equalization converter with reduced number of transformer windings [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(6): 2900 - 2911.
- [3] S W Moore, P J Schneider. A review of cell equalization methods for lithium-ion and lithium-polymer battery systems [J]. SAE Publication, 2001, 5(1): 1 - 5.
- [4] 王晓峰, 王大志, 梁吉, 孔祥华. 双电层电容器及其复合电源系统的研制[J]. 电子学报, 2002, 30(8): 1100 - 1103. WANG Xiao-feng, WANG Da-zhi, LIANG Ji, KONG Xiang-hua. Research on the carbon based double-layer capacitor and hybrid power source [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(8): 1100 - 1103. (in Chinese)
- [5] Y L Lee, M W Cheng. Intelligent control battery equalization for series connected lithium-ion battery strings [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(5): 1297 - 1307.
- [6] X Lu, W Qian, F Z Peng. Modularized buck-boost + cuk converter for high voltage series connected battery cells [A]. Proceedings of 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) [C]. Orlando, FL: IEEE, 2012. 2272 - 2278.
- [7] T H Kim, N J Park, R Y Kim, D S Hyun. A high efficiency zero voltage-zero current transition converter for battery cell e-

qualization [A]. Proceedings of 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) [C]. Orlando, FL: IEEE, 2012. 2590 – 2595.

- [8] 张立森, 王立志. PWM 型开关电容 DC-DC 变换器的非线性动力学行为研究 [J]. 电子学报, 2008, 36(2): 266 – 270.
ZHANG Li-sen, WANG Li-zhi. Study on nonlinear dynamics behavior in PWM switched-capacitor DC-DC converter [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(2): 266 – 270. (in Chinese)
- [9] S Q Li, C C Mi, M Y Zhang. A high-efficiency active battery-balancing circuit using multi-winding transformer [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(1): 198 – 207.
- [10] M Y Kim. A cell selective charge equalizer put converter with auxiliary transformer [A]. Proceedings of IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia [C]. The Shilla Jeju, Korea: IEEE, 2011. 310 – 317.
- [11] M Einhorn, W Roessler, J Fleig. Improved performance of serially connected li-ion batteries with active cell balancing in electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(6): 2448 – 2457.
- [12] M Uno, K Tanaka. Single-switch cell voltage equalizer using multi-stacked buck-boost converters operating in discontinuous conduction mode for series-connected energy storage cells [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(8): 3635 – 3645.
- [13] M Einhorn, W Guertlschmid, T Blochberger, R Kumpusch, R Permann. A current equalization method for serially connected battery cells using a single power converter for each cell [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(9): 4227 – 4237.
- [14] 胡佳俊, 陈后鹏, 等. 大电流负载的片上 LDO 系统设计 [J]. 电子学报, 2013, 41(7): 1431 – 1435.
HU Jia-jun, CHEN Hou-peng, et al. Design of an on-chip LDO system with large loading current [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(7): 1431 – 1435. (in Chinese)
- [15] 熊永华, 杨艳, 何勇, 等. 基于参数在线辨识的改进卡尔曼滤波锂电池 SOC 估算方法 [A]. 第三十一届中国控制会议论文集 [C]. 安徽合肥: 中国自动化学会控制理论专业委员会, 2012. 6820 – 6825.
Xiong Yong-hua, Yang Yan, He Yong, et al. A novel SOC estimation method for li-ion batteries based on improved kalman filter with parameter online identification [A]. Proceedings of the 31th Chinese Control Conference [C]. Hefei, Anhui: Technical Committee on Control Theory of Chinese Association of Automation, 2012. 6820 – 6825. (in Chinese)

作者简介



熊永华 男, 1979 年 1 月生, 湖北洪湖人. 2004 年和 2009 年分别获得中南大学信息科学与工程学院计算机应用技术专业硕士与博士学位, 2006 年至 2008 年在香港城市大学计算机科学系进行联合培养. 现为中南大学副教授、在站博士后、博士生导师. 主要从事汽车电子、透明计算、云计算和企业信息化方面研究.
E-mail: yhxiong@csu.edu.cn



杨艳 女, 1988 年 6 月出生, 湖南长沙人. 2010 年毕业于长沙学院电子信息工程专业, 2013 年获得中南大学电子科学与技术专业硕士学位, 主要从事新能源控制技术与电动汽车电源管理技术研究.
E-mail: yangyan@csu.edu.cn



李浩 男, 1990 年出生, 湖北武汉人. 2012 年本科毕业于中国地质大学(武汉)物理专业, 现为中南大学控制科学与工程系硕士研究生. 主要研究领域包括汽车电子、过程控制.
E-mail: lihao@csu.edu.cn



何勇(通信作者) 男, 1969 年生, 湖南汨罗人. 1994 年硕士毕业于中南大学应用数学专业, 2004 年博士毕业于中南大学控制理论与控制工程专业, 现为中南大学信息科学与工程学院教授、博士生导师、教育部“长江学者”特聘教授. 主要研究方向为鲁棒控制、网络控制和过程控制. E-mail: heyong@csu.edu.cn



吴敏 男, 1963 年生, 广东化州人. 1986 年硕士毕业于中南大学自动化专业, 1999 年博士毕业于日本东京工业大学, 现为中南大学信息科学与工程学院院长、教授、博士生导师、教育部“长江学者”特聘教授. 主要研究方向为过程控制、鲁棒控制和智能系统.
E-mail: min@csu.edu.cn