

动力电池串并联结构重组的均衡充电方法

郭 杰, 王小鹏, 孙春霞, 吴作鹏

(兰州交通大学 电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:动力电池一般是将单体电池相互串联进行充电, 由于工艺误差, 导致各单体充电不均衡, 从而影响电池的性能和使用寿命。为此, 提出了一种串并联结构重组的均衡充电方法。充电开始时, 采集各单体的端电压, 将端电压最大和最小的单体进行并联, 再将剩余单体中端电压最大和最小的电池进行并联, 依此类推, 将所有的并联组合进行串联; 在充电过程中, 实时采集各单体端电压并控制重组模块和外围开关管, 动态地将电池组按上述方式进行串并联, 从而实现电池的低损耗快速均衡充电。仿真实验结果表明所提方法能够使电池实现均衡充电, 并且能将电池电压极差减小到 1 mV 以下。

关键词:动力电池; 均衡充电; 串并联结构重组; 实时动态切换; 低损耗快速充电; 电压极差

中图分类号: TM 912

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.05.024

0 引言

动力电池组大多采用大量单体电池通过串并联组合后进行充放电^[1], 一般有 2 种连接方式: 一种是将部分单体电池先串联成电池组单元, 再与其他电池组单元并联; 另一种是将部分单体电池先并联成电池组单元, 再与其他电池组单元串联。单体电池进行串并联组合可使动力电池组获得高电压、大容量。

当电池组进行串联充电时, 流过各单体的电流相同, 由于生产工艺的误差, 使得各个单体之间存在容量和内阻等方面的差异, 可能导致各单体的充电速度不均, 另外, 在充电过程中, 空间温度分布不均匀和电池老化程度不一致也会引起充电速度的不同, 从而导致充电过程中各单体的荷电状态^[2-3]不均衡, 对外表现为开路端电压不相等。长期的不均衡充电会放大单体之间的差距, 导致部分电池的过充和欠充^[4]等现象, 从而严重影响电池的性能和使用寿命, 甚至带来安全隐患^[5-7]。

目前常用的均衡充电管理方法主要分为耗散型^[1]和非耗散型^[5]2 种。耗散型均衡充电管理方法的电路结构简单, 控制方便, 但该方法会带来较大的能量损耗, 存在能量浪费和热管理问题^[8]; 非耗散型均衡充电管理方法的损耗小, 但时滞性^[6]较严重。减小非耗散型均衡充电管理方法的时滞性以实现快速均衡充电便成了目前该领域研究的重点^[9]。

串并联结构重组的方法主要是利用了串联充电可实现大电流快充的优势和并联支路电压相等的特性, 既能快速充电, 又能针对不同的单体电池进行区别充电^[10-12]。传统的均衡充电方法普遍是在串联电

池组的结构基础上进行均衡充电, 如文献[1, 4]在串联结构的基础上加入均衡电阻, 依靠电阻分流实现均衡; 文献[5]在串联结构的基础上利用电感实现能量转移; 文献[13]在串联结构的基础上能够实现每个电池独立充电; 文献[14]在串联结构的基础上并联电容进行能量转移, 可实现不均衡电池之间的间接并联, 但以电容作为媒介, 降低了均衡充电的速度。串并联结构重组的方法是将电池组分为每 2 个单体一组并联后再相互串联, 可实时动态地重组电池组的串并联结构, 能够实现不均衡电池间能量的直接转移和各个并联电池组合的同时均衡充电。该方法不使用电阻、电容和电感, 可达到低损耗快速均衡充电的目的。需要注意的是, 由于该方法需要用到较多的开关管, 控制相对复杂, 成本相对较高, 不适用于数量过于庞大的动力电池组。

本文给出了基于串并联结构重组的均衡充电方法的电路模型和控制策略, 从理论上证明了该方法的可行性, 并搭建了仿真模型进行验证, 结果表明: 串并联结构重组法可实现快速均衡充电, 并且能将电池电压极差减小到 1 mV 以下。

1 串并联结构重组均衡充电模型电路结构

串并联结构重组均衡充电模型的电路结构如图 1 所示。该模型通过单片机控制开关管和正负极重组模块, 使电池按端电压差较大的标准进行并联, 即优先并联端电压差最大的 2 个电池, 再并联剩余电池中端电压差最大的 2 个电池, 依此类推, 直到所有的电池都完成并联, 然后将所有的并联组合相互串联进行充电, 当流经所有并联组合的 2 个电池的电流之差都达到某个阈值时, 重新将所有电池按端电压差较大的标准进行并联, 再相互串联进行充电, 如此反复。这种方法使用了较多的 MOS 管, 但基本不使用电阻、电感和电容, 可实现任意 2 个电池之间的串联或并联, 电池间的能量可直接转移, 并且可完成

收稿日期: 2018-11-28; 修回日期: 2019-02-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61761027)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61761027)

多个并联电池组的同时均衡充电,从而达到低损耗快速均衡充电的目的。

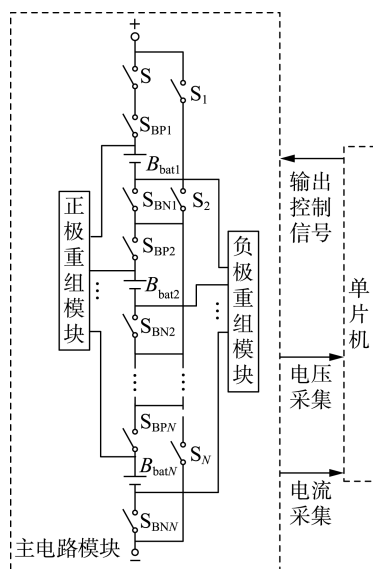


图 1 串并联结构重组均衡充电模型的电路结构

Fig.1 Circuit structure of balanced charging model with reconstructed series-parallel structure

2 硬件原理

当电池采用常规的分段充电方法时,充电过程大体分为恒流充电和恒压充电阶段。开始充电时采用恒流充电模式,当电池组的端电压达到切换电压时,切换为恒压充电模式,直到充电电流接近 0 时,结束充电^[15]。

图 1 所示主电路主要是由电池组和配合重组模块决定电池间连接关系的开关组成,例如要实现 B_{bat1} 与 B_{bat2} 的并联,需要重组模块将它们的正、负极分别相连,同时闭合 S_{BP1} 、 S_{BN1} 和 S_2 ,断开 S_{BP2} 、 S_{BN2} 和 S_1 ,或者断开 S_{BP1} 、 S_{BN1} 和 S_2 ,闭合 S_{BP2} 、 S_{BN2} 和 S_1 。设计时所用开关采用 MOS 管,其导通电阻可以忽略。

从动力电池的恒流充电电压特性曲线(见附录中的图 A1)可以看出,在恒流充电模式下,随着时间的推移,电池的端电压上升,并且在某一段很短的时间内可视为线性上升;从动力电池的恒压充电电流特性曲线(见附录中的图 A2)可以看出,随着恒压充电的进行,充电电流近似呈指数下降。结合以上 2 个特性,在任意较短的时间内,可将电池视作具有一定容值的等效电容。

为了验证该方法的可行性,对串联充电形成不均衡过程的耗时和并联充电消除不均衡的耗时之间的关系进行估算。

假设有 2 个不均衡的电池进行并联均衡充电(模型图见附录中的图 A3),初始状态下,第 1 个电池的端电压为 U_1 ,第 2 个电池的端电压为 U_2 ,并且 $U_2 > U_1$,则有 $\Delta U = U_2 - U_1$,假设它们的等效容值分别

为 C_{c1} 和 C_{c2} ,内阻分别为 r_1 和 r_2 。事实上,2 个电池的内阻相近,不妨规定:

$$r_1 \approx r_2 = r \quad (1)$$

假设在充电过程中,第 1 个电池单元的端电压为 u_1 ,第 2 个电池单元的端电压为 u_2 ,且 $u_2 > u_1$,则有:

$$\Delta u = u_2 - u_1 \quad (2)$$

此时流过第 1 个电池单元的电流为 i_1 ,流过第 2 个电池单元的电流为 i_2 ,则有:

$$\Delta i = i_1 - i_2 \quad (3)$$

那么,有式(4)成立。

$$i_1 r + u_1 = i_2 r + u_2 \quad (4)$$

即有:

$$\Delta u = \Delta i r \quad (5)$$

同时有:

$$i_1 = C_{c1} \frac{du_1}{dt} \quad (6)$$

$$i_2 = C_{c2} \frac{du_2}{dt} \quad (7)$$

由式(6)、(7)可得:

$$i_1 - i_2 = C_{c1} \frac{du_1}{dt} - C_{c2} \frac{du_2}{dt} \quad (8)$$

由于电池制造工艺的误差是微小的,而电池在某一阶段的等效电容 C_{c1} 和 C_{c2} 是很大的,所以在并联均衡充电过程中近似有 $C_{c1} \approx C_{c2}$ 。为了提高计算精度,假设:

$$C_c = \frac{C_{c1} + C_{c2}}{2} \quad (9)$$

联立式(2)、(3)、(8)和(9)可得:

$$\Delta i \approx -C_c \frac{d\Delta u}{dt} \quad (10)$$

将式(5)代入式(10)可得:

$$C_c \frac{d\Delta u}{dt} + \frac{\Delta u}{r} \approx 0 \quad (11)$$

因此有:

$$\Delta u \approx \Delta U \exp[-t/(C_c r)] \quad (12)$$

由式(12)可知,要使 2 个电池绝对均衡所需的时间为无穷大,因此,不妨规定 $\Delta i \leq 0.01C$ 为一次均衡充电结束的判断条件,其中, C 为电池的标称容量,或称为电池放电“C”倍率,1C 表示电池从满荷状态 1 h 完全放电时的平均电流强度,用于表征电池充放电电流的大小。因此有:

$$t \approx C_c r \ln \frac{\Delta U}{r \times 0.01C} \quad (13)$$

在恒流充电阶段,电源以一定的电流对电池组进行充电,假设其中2个电池串联以恒流 I 进行充电,从均衡状态经过时间 T 后,第1个电池的电压上升 δU_1 ,第2个电池的电压上升 δU_2 。假设 $\delta U_2 > \delta U_1$,那么 $\Delta U = \delta U_2 - \delta U_1$,可得:

$$IT = C_{e1} \delta U_1 = C_{e2} \delta U_2 \quad (14)$$

当这2个电池并联以电流 $2I$ 进行充电时,结合式(9)、(11)和(14)可得:

$$\frac{IT}{\delta U_2} \left(1 + \frac{\Delta U}{2\delta U_1} \right) \frac{d\Delta u}{dt} + \frac{\Delta u}{r} \approx 0 \quad (15)$$

为了将 δU_1 和 δU_2 计入运算,由式(12)、(14)可得:

$$\Delta u \approx \Delta U \exp \left[-\frac{2\delta U_1 \delta U_2}{(2\delta U_1 + \Delta U) I T r} t \right] \quad (16)$$

根据式(13),可得:

$$t \approx \frac{ITr}{\delta U_2} \left(1 + \frac{\Delta U}{2\delta U_1} \right) \ln \frac{\Delta U}{r \times 0.01 C} \quad (17)$$

式(17)中, ΔU 相对 δU_1 的影响较小,所以可近似认为:

$$t \approx \frac{ITr}{\delta U_2} \ln \frac{\Delta U}{r \times 0.01 C} = \frac{C_{e1} + C_{e2}}{2} r \ln \frac{\Delta U}{r \times 0.01 C} \quad (18)$$

由式(18)可知,在充电过程中始终有式(19)成立时,均衡效果最佳。

$$\frac{Ir}{\delta U_2} \ln \frac{\Delta U}{r \times 0.01 C} \leq 1 \quad (19)$$

在等效电容不变的情况下,上升同样的电压,充电电流 I 越小, t 相较于 T 越小,均衡效果越好。而 t 的绝对大小与充电电流无关。

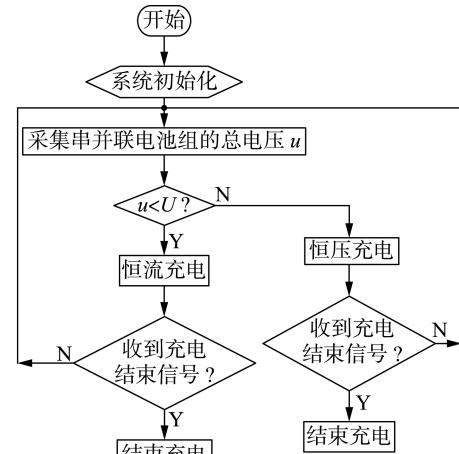
在恒压充电阶段,随着充电的进行,充电电流 I 越来越小,由式(18)可知,均衡充电时间相对形成这种不均衡的时间越来越小,则均衡效果越来越好。

3 软件控制流程与主要算法设计

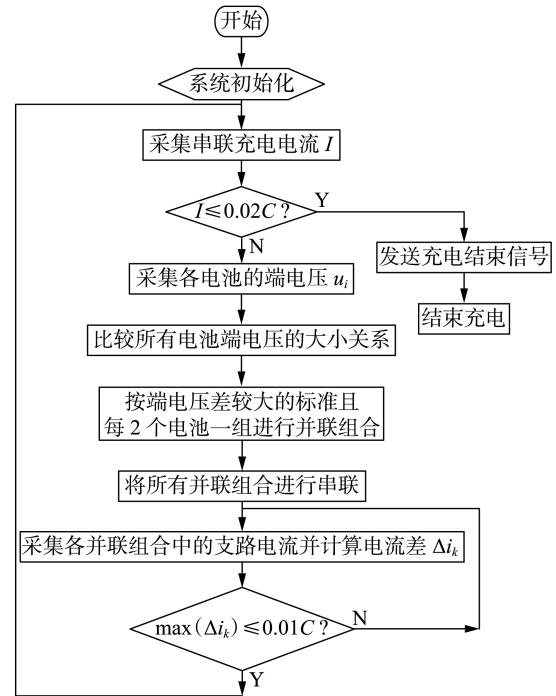
3.1 控制流程

本文中电池组均衡充电控制暂不考虑温度、湿度和气压等因素的影响,其充电过程大体分为恒流充电阶段和恒压充电阶段,由于串并联结构重组的方法是将电池组按每2个电池并联后再串联的方式连接,恒流充电阶段以所有电池的端电压之和的1/2(设为 u)等于电源的最高电压(设为 U)为结束标准,恒压充电阶段以串联充电电流小于一个接近0的值为结束标准。根据国家标准 GB/T 18287—2000,当单体电池恒压充电至电流小于等于0.01C时,视为电池充满。本文中所涉方案将每2个单体并联后再串联,因此判断并联组合充满的恒压充电电流应小于等于0.02C。

恒压和恒流充电属于电源供电范畴,因此需要采用单独的芯片控制,且电源控制芯片与电池组均衡充电控制芯片之间可实现通信。电池组均衡充电的整体控制流程如图2所示。



(a) 电源控制流程



(b) 均衡控制流程

图2 电池组均衡充电整体控制流程

Fig.2 Overall control flowchart of balanced charging of battery packs

3.2 主要算法设计

为了采用串并联重组的方法对电池组进行有效的均衡充电,同时尽可能地降低开关损耗和控制难度,本文设计了相应的算法,具体如下。

若将与电池串联的开关称为串联开关,例如对于 B_{bat1} 而言, S_{BP1} 和 S_{BN1} 为其串联开关;将与电池并联的开关称为并联开关,例如对于 B_{bat1} 而言, S_1 为其并联开关;将重组模块中的开关称为重组开关(正负对应开关状态相同),图1中的 S 为总开关。如果有

N (N 为偶数) 个电池单体, 采集到所有电池的端电压 u_i ($i=1, 2, \dots, N$) 后, 按端电压由大到小的顺序排列前 $N/2$ 个电池, 再按端电压由小到大的顺序排列剩余的 $N/2$ 个电池, 将 2 组数据分别保存为数组 A 和 B 。在进行排序时, 如果 $u_i = u_{i+n}$ (n 为正整数), 则按 $u_i > u_{i+n}$ 的方式排列。图 3 为各类开关高低电平控制信号的产生算法。设当 $I \leq 0.02C$ 时的逻辑为 1, 否则为 0; 当 $\sum u_i/2 \geq U$ 时的逻辑为 1, 否则为 0。

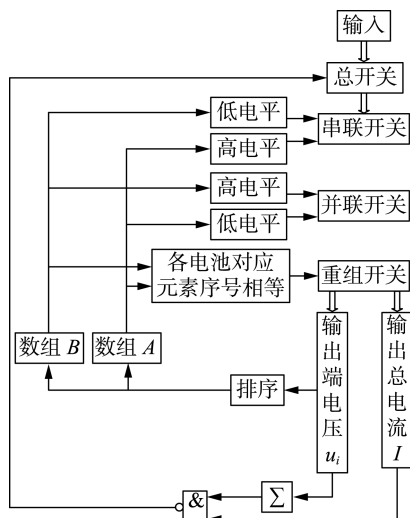


图 3 各类开关控制信号产生算法

Fig.3 Generative algorithms of control signals for switches

由图 1 可知, 电路所涉及的开关数为 $(N+1)^2$ 个, 而根据上述算法, 在每次串并联重组时, 即使所有电池都需要重组, 参与工作的开关数最多为 $5N$ 个, 这使得开关损耗不至于过大。

4 实验结果与分析

本文基于 $64 \text{ V}/20 \text{ A} \cdot \text{h}$ 的磷酸铁锂电池搭建了仿真实验模型, 单体电池的电压标称值为 3.2 V 。单体电池恒压充电电压为 3.65 V , 暂不考虑浮充。其中重组模块由一系列开关管组合封装而成。

首先, 设置 4 个单体电池, 充电前的端电压分别为 2.8 V 、 2.9 V 、 3.0 V 和 3.1 V , 采用 $0.5C$ 的电流进行充电仿真。开关电阻法属于耗散型均衡充电方法的一种, 均衡过程中的能量耗散较严重, 但其在传统均衡充电方法中均衡效果较好, 且便于控制, 因此, 本文将其与串并联结构重组的方法进行对比。图 4 给出了无均衡控制、采用开关电阻法和采用串并联结构重组法进行充电均衡时, 电池充电前 600 s 的电压变化曲线。

无均衡控制时的电池充电电压如图 4(a) 所示, 电池由于正处在电压快速增加到电压趋稳的充电过程, 所以电池的端电压极差有减小的趋势, 但依然处于不均衡充电状态; 采用开关电阻法时的电池充电电压如图 4(b) 所示, 各单体的电压随着充电的进

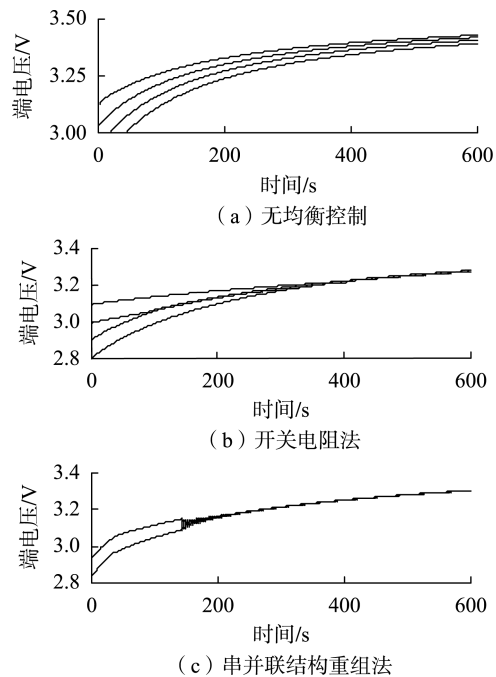


图 4 部分电池前 600 s 充电电压

Fig.4 Charging voltage of partial batteries in first 600 s

行, 逐渐趋于均衡; 采用开串并联结构重组法时的电池充电电压如图 4(c) 所示, 充电开始时, 由于 4 个电池的连接方式为 2 组电池组 (每组 2 个单体电池并联) 相串联进行充电, 一次并联电池的电压相同, 串联电池的电压差则表现得很明显, 当流过并联电池组的电流差小于某个阈值时, 重组并联电池组, 进行新的均衡充电, 随着充电的进行, 各单体间的电压趋于均衡。对比图 4(b) 和图 4(c) 可明显看出, 串并联结构重组法的均衡速度较开关电阻法快。图 4 对应的局部放大图见附录中的图 A4。

为了说明串并联结构重组法的性能, 将电池在 3 种情况下充电到 500 s 时的电压均值和极差进行对比, 结果如表 1 所示。

表 1 3 种情况下充电到 500 s 时的电池电压对比

Table 1 Comparison of batteries' voltage when charging time is 500 s under three conditions

情况	电池端电压/V	电压均值/V	电压极差/mV
充电前	3.100 0, 3.000 0, 2.900 0, 2.800 0	2.950 0	300.0
无均衡控制	3.410 3, 3.398 8, 3.384 6, 3.367 2	3.390 2	43.1
开关电阻法	3.250 6, 3.248 2, 3.245 7, 3.245 1	3.247 4	5.5
串并联结构重组法	3.278 2, 3.278 1, 3.277 3, 3.276 9	3.277 6	1.3

从表 1 可以看出, 相较于无均衡控制的情况, 在采用开关电阻法与串并联结构重组法的情况下, 电池端电压极差均大幅度减小, 但电压均值却是稍有下降, 这表明均衡充电减缓了充电速度。对比开关电阻法和串并联结构重组法可发现, 后者在充电到

500 s 时所带来的极差明显小于前者,且后者的电池电压均值比前者高,这表明串并联结构重组法比开关电阻法的均衡效果好,同时充电速度更快。

最后进行如下完整的仿真实验:充电前电池组中各单体电池端电压分别为 3.150 4 V、3.147 2 V、3.144 0 V、3.140 8 V、3.137 5 V、3.134 1 V、3.130 7 V、3.127 2 V、3.123 6 V、3.120 0 V、3.116 2 V、3.112 4 V、3.108 6 V、3.104 6 V、3.100 6 V、3.096 4 V、3.092 2 V、3.087 9 V、3.083 5 V、3.079 0 V,恒流充电电流设定为 $0.2C$ 。无均衡控制时完整充电过程中的端电压变化曲线见图 5(a)(局部放大图见附录中的图 A5),采用串并联结构重组法进行均衡充电时的端电压变化曲线见图 5(b)(局部放大图见附录中的图 A6)。可以看出,在无均衡控制时的整个充电过程中,各单体端电压差较大,在恒流充电结束时,部分单体处于严重的过充状态,部分单体处于严重的欠充状态,在 15 000 s 时,电压极差约为 311 mV;采用串并联结构重组法进行均衡充电时,整个过程中的端电压差非常小,到 15 000 s 时,所有电池的充电电压特性曲线基本重合。

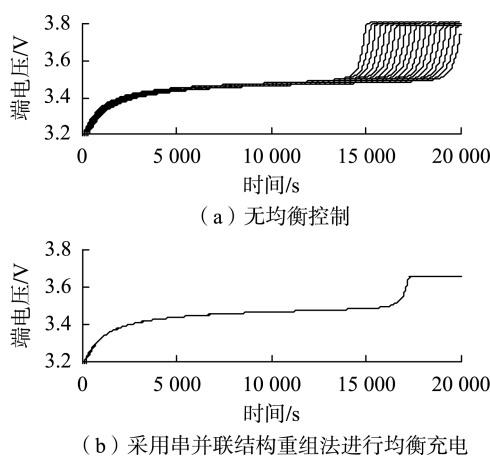


图5 电池组的充电电压

Fig.5 Charging voltage of battery packs

表2给出了无均衡控制和采用串并联结构重组法进行均衡充电时,在充电进行到 5 000 s、10 000 s 时的电池电压极差与均值。

表2 有、无均衡控制时的电压均值和极差对比

Table 2 Comparison of voltage means and ranges with and without balanced control

有无均衡控制	电压均值/V		电压极差/mV	
	5 000 s	10 000 s	5 000 s	10 000 s
无	3.441 3	3.469 8	18.6	14.6
有	3.439 7	3.467 7	1.0	0.6

从表2可以看出,相较于无均衡控制,采用均衡充电方法时的电池电压极差小得多,到 10 000 s 时已不足 1 mV;但是,采用均衡充电方法时的电池电压均值比无均衡控制时的电压均值略小。总体而

言,串并联结构重组法对减慢充电速度的效果并不明显,但能获得较好的充电均衡效果。

5 结论

本文提出了一种串并联结构重组的均衡充电方法,利用了并联电池充电的均衡特性,将电池组按端电压差较大的标准分成若干个并联组合,每组有 2 个电池并联,然后将并联组合相互串联进行充电;给出了相应的软件控制策略,进行了仿真实验,得出了相应的仿真结果。将本文所提方法与开关电阻法进行了对比,发现本文所提方法具有更快的充电速度和更好的均衡效果。同时,本文所提方法未用到大阻值的耗能元件,能实现低损耗均衡充电。本文所提方法需要用到的 MOS 管数量较大,但每次重组只会涉及少部分的开关,因此不至于带来太大的开关损耗,但在电池数量庞大的情况下,依然会带来较大的损耗。另外,成本和控制难度在目前依然是本文所提方法存在的问题。综上所述,本文所提方法适用于数量相对较少的电池组进行均衡充电的情况。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 徐顺刚,王金平,许建平. 一种延长电动汽车蓄电池寿命的均衡充电控制策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(3):43-48.
XU Shungang, WANG Jinping, XU Jianping. An equalizing charge control strategy to extend battery cycle life for electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(3): 43-48.
- [2] OUYANG Quan, CHEN Jian, ZHENG Jian, et al. SOC estimation-based quasi-sliding mode control for cell balancing in lithium-ion battery packs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 3427-3436.
- [3] OUYANG Quan, CHEN Jian, ZHENG Jian, et al. Optimal cell-to-cell balancing topology design for serially connected lithium-ion battery packs[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 350-360.
- [4] 徐顺刚,钟其水,朱仁江. 动力电池均衡充电控制策略研究[J]. 电机与控制学报,2012,16(2):62-65.
XU Shungang, ZHONG Qishui, ZHU Renjiang. Research of equalizing charge control strategy for power battery[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(2): 62-65.
- [5] 梁嘉羿,王友仁,黄薛. 串联蓄电池组均衡控制策略研究[J]. 电力电子技术,2016,50(11):63-65.
LIANG Jiayi, WANG Youren, HUANG Xue. Research on the strategy of balancing control for series battery[J]. Power Electronics, 2016, 50(11): 63-65.
- [6] 裴锋,黄向东,罗玉涛,等. 电动汽车动力电池变流放电特性与荷电状态实时估计[J]. 中国电机工程学报,2005,25(9):164-168.
PEI Feng, HUANG Xiangdong, LUO Yutao, et al. Variable current discharge characteristics and SOC estimation of EV/HEV battery[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 164-168.
- [7] 宋永华,阳岳希,胡泽春. 电动汽车电池的现状及发展趋势[J]. 电网技术,2011,35(4):1-7.
SONG Yonghua, YANG Yuexi, HU Zechun. Present status and de-

- velopment trend of batteries for electric vehicles[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 1-7.
- [8] 张寅孩, 林俊, 黎继刚. 基于储能电感对称分布的动态均衡充电的研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 136-141.
ZHANG Yinai, LIN Jun, LI Jigang. Dynamic charge equalization with inductor symmetrically distributed[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 136-141.
- [9] 杨毅. 基于脉冲变压器的锂离子电池组均衡系统研究[J]. 电力电子技术, 2014, 48(9): 23-25.
YANG Yi. Research on balancing system for li-ion battery based on pulse transformer[J]. Power Electronics, 2014, 48(9): 23-25.
- [10] HAN Weiji, ZHANG Liang. Charging and discharging spaces-based current allocation in parallel-connected battery systems[C]//2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Fort Worth, TX, USA: IEEE, 2016: 1209-1214.
- [11] DONG Bo, LI Ye, HAN Yehui. Parallel architecture for battery charge equalization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(9): 4906-4913.
- [12] CHEN Changsong, LIU Baoqi, DUAN Shanxu, et al. Centralized control of parallel connected power conditioning system for battery energy storage system in charge-discharge-storage power station[C]//2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, CO, USA: IEEE, 2013: 1087-1091.
- [13] 陈益广, 唐林, 沈勇环. 基于 Boost-Buck 电路的锂离子电池组均衡充电方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(10): 56-60.
CHEN Yiguang, TANG Lin, SHEN Yonghuan. Equalization charging method of lithium-ion battery series based on boost-buck circuit[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(10): 56-60.
- [14] 马秀娟, 王晓亮, 张华强. 基于超级电容器的动力锂离子电池均衡电路[J]. 电力电子技术, 2011, 45(12): 57-59.
MA Xiujuan, WANG Xiaoliang, ZHANG Huaqiang. A super capacitor based equalizer for power lithium-ion battery[J]. Power Electronics, 2011, 45(12): 57-59.
- [15] 刘和平, 曾启才, 郭强, 等. 电流矢量调制的动力电池组充电系统[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 81-85, 91.
LIU Heping, ZENG Qicai, GUO Qiang, et al. Power battery charging system based on current SVPWM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 81-85, 91.

作者简介:



郭杰

郭杰(1989—),男,四川宜宾人,硕士研究生,主要研究方向为电路与系统、电力系统自动化(E-mail: 1078852577@qq.com);

王小鹏(1969—),男,甘肃庆阳人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为数字信号处理(E-mail: wangxp1969@sina.com);

孙春霞(1966—),女,内蒙古包头人,副教授,主要研究方向为电路与系统研究以及智能系统控制等(E-mail: 592794067@qq.com)。

Balanced charging method of power batteries with reconstructed series-parallel structure

GUO Jie, WANG Xiaopeng, SUN Chunxia, WU Zuopeng

(School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Power batteries are generally charged by connecting single cells in series. Due to the process error, the charging of each cell is unbalanced, which affects the performance and service life of the batteries. Therefore, a balanced charging method of power batteries with reconstructed series-parallel structure is proposed. At the beginning of charging, the terminal voltage of each cell is collected, the cells respectively with maximum and minimum terminal voltages are connected in parallel, then the ones respectively with maximum and minimum terminal voltages in the remaining cells are connected in parallel, and so on, finally all the parallel combinations are connected in series. In the process of charging, the terminal voltage of each cell is collected real-time to control the reconstructed modules and peripheral switches, thus the cells are connected in series and parallel dynamically according to above method, so as to realize low-loss and fast balanced charging of the batteries. Simulative results show that the proposed method can realize balanced charging among batteries and reduce the voltage range of batteries to less than 1 mV.

Key words: power batteries; balanced charging; reconstructed series-parallel structure; real-time dynamic switching; low-loss and fast charging; voltage range

附录

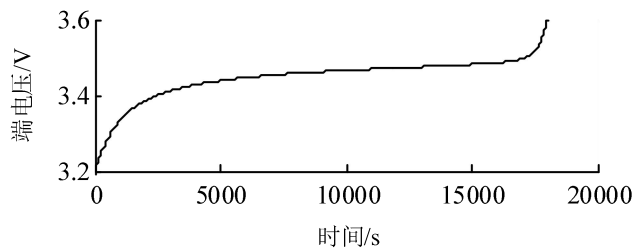


图 A1 恒流充电阶段的电压特性曲线

Fig.A1 Voltage characteristic curve of constant current charging stage

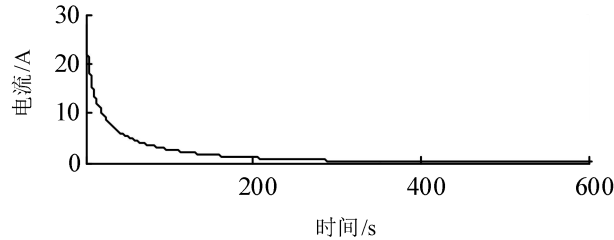


图 A2 恒压充电阶段的电流特性曲线

Fig.A2 Current characteristic curve of constant voltage charging stage

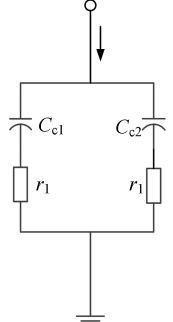
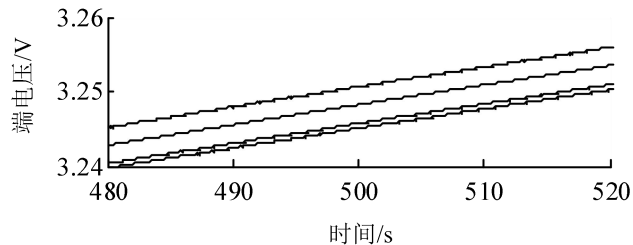
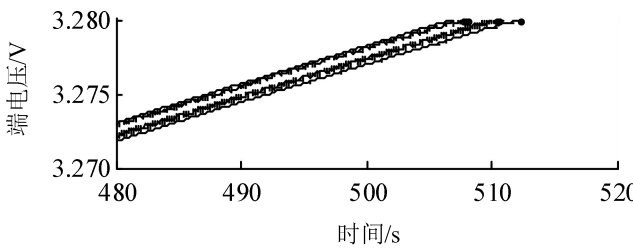


图 A3 电池均衡充电电容模型

Fig.A3 Capacitor model of balanced charging battery



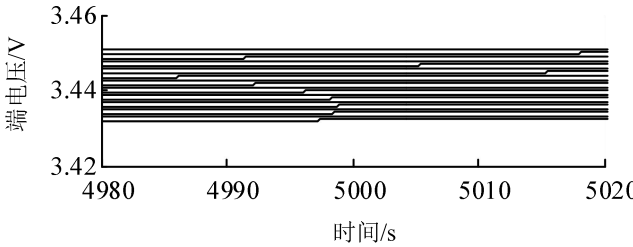
(a) 开关电阻法

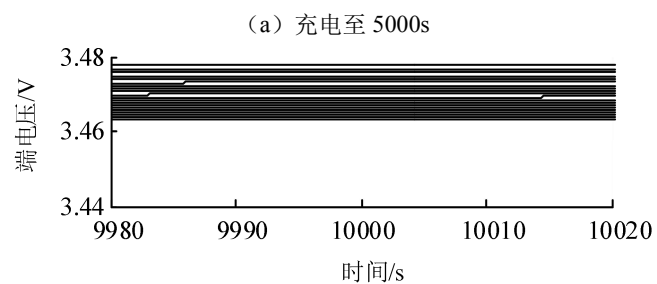


(b) 串并联结构重组法

图 A4 部分电池前 600s 充电电压局部放大图

Fig.A4 Partial enlarged views of charging voltage of a part of batteries in first 600s

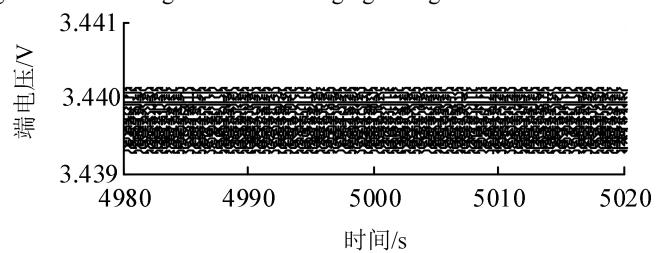




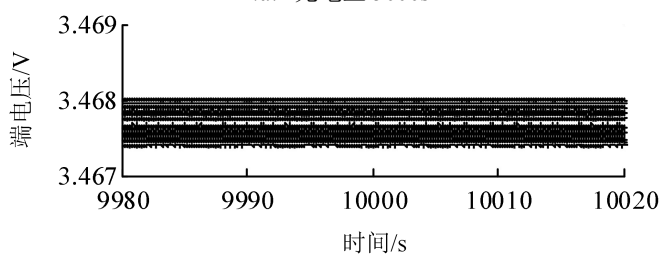
(b) 充电至 10000s

图 A5 无均衡控制时充电电压的局部放大图

Fig.A5 Partial enlarged views of charging voltage without balanced control



(a) 充电至 5000s



(b) 充电至 10000s

图 A6 有均衡控制时充电电压的局部放大图

Fig.A6 Partial enlarged views of charging voltage with balanced control