

锂离子蓄电池组充放电均衡器及均衡策略

刘红锐, 李园专, 陈仕龙, 帅春燕
(昆明理工大学电力工程学院, 云南昆明 650500)

摘要: 本文提出了一种针对锂离子蓄电池组的均衡器, 根据电池组充放电状态采取两种不同的均衡策略. 当电池组处于充电状态时, 对电池组中能量最高的单体电池进行均衡放电, 以提高整个电池组的充电容量. 当电池组处于放电状态时, 对电池组中能量最低的单体电池进行均衡充电, 以提高整个电池组的放电容量. 均衡器以电感为储能元件, 等效的均衡电路为典型的升降压斩波电路和降压斩波电路, 均衡电流可控可调. 本文详细分析了均衡器的工作原理和均衡策略, 同时进行了仿真实验和实际的均衡实验, 实验结果均证明了此均衡器的可行性.

关键词: 锂离子电池; 均衡器; 均衡策略; 升降压斩波电路; 降压斩波电路; 均衡实验

中图分类号: TM91 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)08-1981-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.08.030

Lithium-ion Battery Charging and Discharging Equalizer and Balancing Strategies

LIU Hong-rui, LI Yuan-zhuan, CHEN Shi-long, SHUAI Chun-yan

(School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: This paper proposes an equalizer for lithium-ion battery and two different balancing strategies are used according to battery charging and discharging states. In battery charging state, the battery cell with the highest energy is balanced and discharged by the equalizer to improve charge capacity of the whole battery pack. In battery discharging state, the battery cell with the lowest energy is balanced and charged by the equalizer to improve discharge capacity of the whole battery pack. The balancing circuit uses an inductor as the energy storage element and the equivalent balancing circuits are the typical boost-buck chopper circuit and the buck chopper circuit, further the balancing current is controllable and adjustable. This paper draws working principle and control strategies of the equalizer. Furthermore the simulation and actual balancing experiments have been completed. Finally, the feasibility of the equalizer suggested in this paper is verified according to the balancing experimental results.

Key words: lithium-ion battery; equalizer; balancing strategy; boost-buck chopper; buck chopper; balancing experiment

1 引言

锂离子单体电池具有体积小、重量轻、标称电压相对较高、循环寿命长、无记忆效应等优越的性能, 受到市场的青睐. 锂离子单体电池的标称电压在 3.6V 左右, 因此使用中需要大量的单体电池串联来满足不同的电压需求^[1-3]. 由于单体电池间的性能差异, 在串联使用过程中出现各单体电池间能量不一致的情况, 而单体电池不允许出现过充电和过放电, 串联成

组后的锂离子蓄电池组性能明显下降^[4-5]. 因此必须采取有效的均衡措施来提高电池组的充放电容量, 延长其使用寿命.

目前蓄电池均衡器主要分为能耗型均衡和非能耗型均衡^[6,7]. 能耗型均衡主要是并联电阻均衡, 均衡电路简单易控, 但存在耗能、耗时、需散热装置等缺点. 非能耗型均衡是以电容、电感、感容、变压器为均衡元件的均衡器, 由于均衡元件和具体均衡策略不同, 其均衡效

果也不同. 电容均衡器^[8], 均衡实质是通过单体电池间的电压差实现均衡, 而实际这个电压差很小, 最高只有几百毫伏, 考虑均衡回路中开关管的导通压降, 均衡能量很难转移. 电感均衡方案^[2], 以电流作为载体进行能量转移, 均衡电流的可控性强, 其均衡效率与具体的均衡策略有关. 变压器均衡方案^[6,9]: 一方面变压器体积大、重量重, 除了开关损耗, 变压器损耗也不能忽略, 且对变压器的精度要求高; 另一方面由于采用同轴多副边反激式变压器进行反激能量, 因而均衡电流的可控性差.

根据均衡能量的流向, 目前非能耗均衡器的均衡策略主要有三种:

(1) 均衡能量由电池组中能量最高的单体电池向最低单体电池转移^[1], 理论上该均衡策略有较高的均衡速度, 但开关控制复杂, 且开关损耗大, 均衡效率较低;

(2) 均衡能量只能在串联的相邻单体电池之间转移^[10-12], 这种迂回的均衡策略, 其均衡速度低, 开关损耗也大;

(3) 电池组充电时对电池组中能量最高的单体电池放电, 而电池组放电时对电池组中能量最低的单体电池充电, 该均衡策略能有效提高电池组的充放电容量.

综合上述均衡器及均衡策略的优缺点, 本文提出一种以电感为储能元件的充放电均衡器及均衡策略, 适用于锂离子电池储能系统、电动汽车车载锂离子动力电池系统及其他用锂离子电池的设备中.

2 均衡器及均衡策略

2.1 均衡器拓扑电路

均衡器拓扑电路如图 1 所示, 由 A 组和 B 组两组开关、一个电感 L、一个功率开关 M、一个电压源 E 和一个续流二极管 D 组成, 其中电压源 E 为外部蓄电池, A、B 两组开关和功率开关 M 均为电力 MOSFET, 为了防止

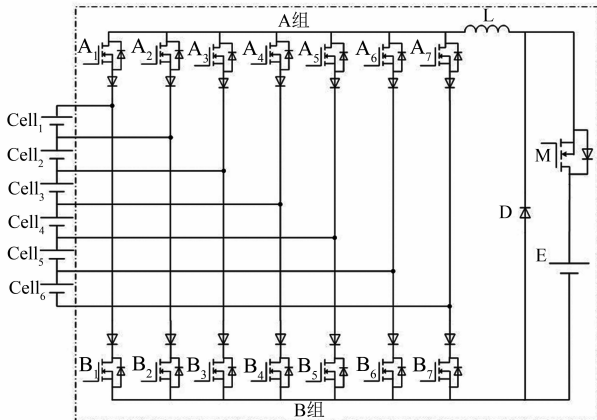


图1 均衡器拓扑电路

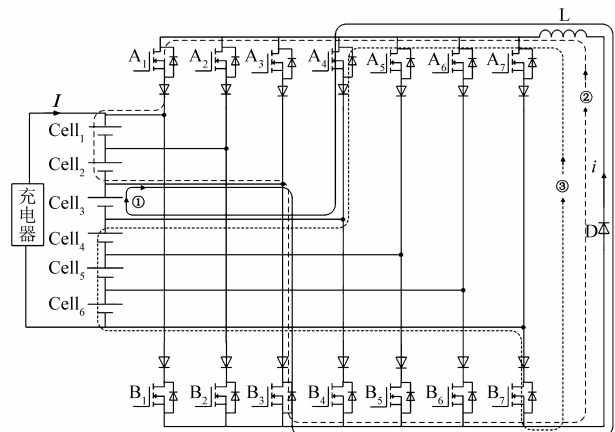
电池短路, A、B 两组 MOS 开关均串联了二极管. 使用中根据串联单体电池的数目和均衡电流的大小选择 MOS 开关管, 为了降低开关损耗尽量选择导通电阻小的 MOS 开关管, 同时拓扑电路中的二极管可选择导通电阻小的肖特基二极管.

2.2 均衡策略

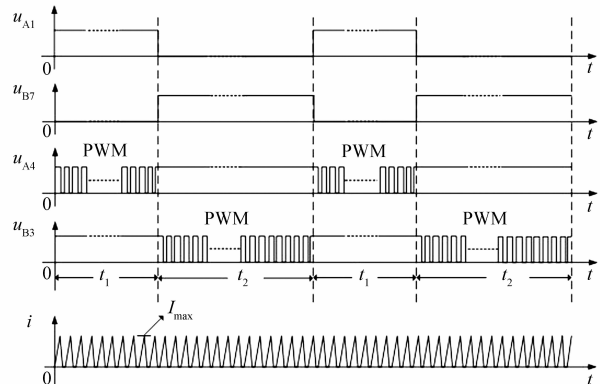
根据电池组的充电状态和放电状态的不同, 均衡策略分为电池组充电均衡策略和电池组放电均衡策略, 下面以 6 个锂离子单体电池串联组成的电池组为例来阐述两种均衡策略的工作原理.

(1) 电池组充电均衡策略

电池组充电时的均衡拓扑电路如图 2 (a) 所示, 左边为充电器, 其充电电流为 I . 假设在充电过程中, 单体电池 Cell₃ 的能量最高, 其上面有两个单体电池 Cell₁ 和 Cell₂ (简称上电池), 下面有三个单体电池 Cell₄、Cell₅ 和 Cell₆ (简称下电池), 则均衡策略为 Cell₃ 分两个回路向同组中的其它所有电池放电, 而上电池的充电开关为 A₁ 和 B₃, 下电池的充电开关为 A₄ 和 B₇, Cell₃ 的放电开关为 A₄ 和 B₃, 图中标注的回路①即为 Cell₃ 的均衡放电回路, 回路②为上电池的充电回路, 回路③为下电池的充电回路, 通过以上 3 个回路, 能量由单体电池 Cell₃ 向同组中的其它所有单体电池



(a) 电池组充电均衡拓扑电路



(b) 相关波形

图2 电池组充电均衡拓扑电路及相关波形

转移. 均衡过程中各开关的控制规律如图 2(b) 所示, 当单体电池 Cell₃ 向其上电池转移能量时, 需要控制上电池的上下两充电开关 A₁ 和 B₃ 一直导通, 而对 Cell₃ 的上放电开关 A₄ 进行 PWM 控制; 同样当单体电池 Cell₃ 向其下电池转移能量时, 只需控制下电池的两充电开关 A₄ 和 B₇ 一直导通, 而对 Cell₃ 的下放电开关 B₃ 进行 PWM 控制.

均衡时有三个开关参与导通控制, 其中两个处于导通状态, 因此只需对一个开关进行 PWM 控制, 均衡电路为典型的升降压斩波电路, 调节开关器件的导通占空比就可控制均衡电流 i . 如图 2(b) 所示, t_1 为上均衡的时间, t_2 为下均衡的时间, 为了使上下每个单体电池吸收相当的均衡能量, 则两个时间比需要满足 $t_1/t_2 = 2/3$.

(2) 电池组放电均衡策略

电池组放电时的均衡拓扑电路如图 3(a) 所示, 假设单体电池 Cell₃ 的能量最低, 则均衡时电源 E 对单体电池 Cell₃ 进行充电均衡. 单体电池 Cell₃ 的上下两充电开关为 A₃ 和 B₄, 电源 E 的放电开关为 M, 均衡时, 如图 3(b) 所示, 只需控制单体电池 Cell₃ 的两充电开关一直导通, 而对开关 M 进行 PWM 控制, 就可实现能量由电源 E 向单体电池 Cell₃ 转移.

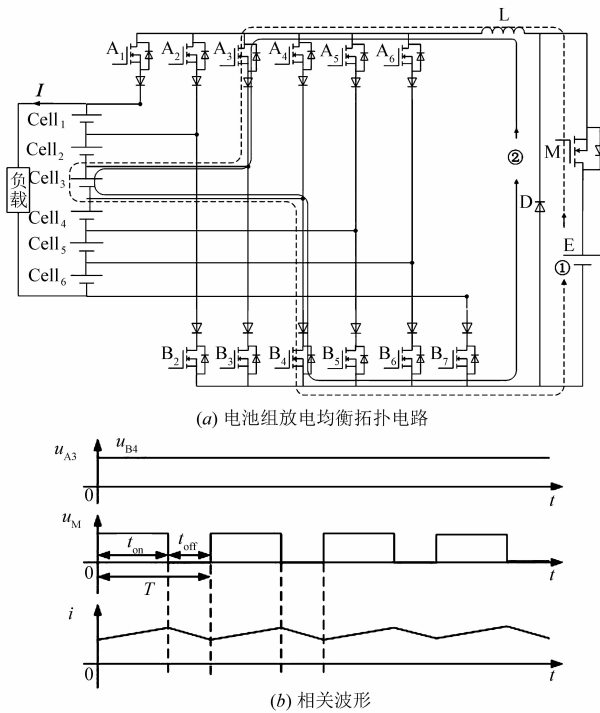


图3 电池组放电均衡拓扑电路及相关波形

均衡时有三个开关参与导通控制, 其中被均衡的单体电池的两充电开关处于导通状态, 而只需对开关 M 进行 PWM 控制, 均衡电路为典型的降压斩波电路, 通过调节开关 M 的导通占空比即可调节均衡电流 i 的

大小.

3 均衡仿真实验

在 Matlab-Simulink 环境下搭建仿真电路, 选择额定容量为 60Ah 的六个串联的锂离子单体电池, 标称电压为 3.6V. 以每个电池的剩余电量, 即 SOC 值, 来衡量能量的高低, 各个单体电池的初始 SOC 值分别为 100%、90%、80%、70%、60% 和 50%, 记为 SOC₀. 均衡器中电感值为 0.5mH; 电压源 E 设置为 24V; 电池放电时, 开关 M 的 PWM 频率为 5kHz, 导通占空比为 25%, 电池组的放电电流波形如图 4 所示的 UDDS 工况电流, 其周期为 1370s; 电池充电时, 开关 PWM 频率为 500Hz, 导通占空比为 65%, 电池组的充电电流为 20A.

电池组充放电停止条件为: 当电池组的充电 SOC 值到达 100% 时停止充电, 当电池组的放电 SOC 值到达 20% 时停止放电.

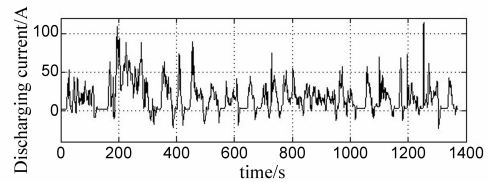


图4 UDDS 工况下的放电电流波形

3.1 均衡仿真实验

本文选择了六个 SOC 值相差较大的单体电池, 一次放电结束和一次充电结束为一个充放电循环, 要使所有的单体电池的 SOC 值趋于一致, 则需要多个充放电循环, 因此进行了三次充放电均衡循环实验.

(1) 第 1 次充放电循环实验

首先对初始 SOC 值为 SOC₀ 的六个串联单体电池进行放电实验, 放电电流为图 4 所示. 放电时对 SOC 值最低的单体电池 Cell₆ 进行均衡充电. 放电过程中各个单体电池的 SOC 变化曲线如图 5 所示, 均衡时间为 5322s, 均衡结束时各单体电池的 SOC 值分别为 60.3%、50.2%、40.1%、30%、20% 和 26.7%, 记为 SOC₁.

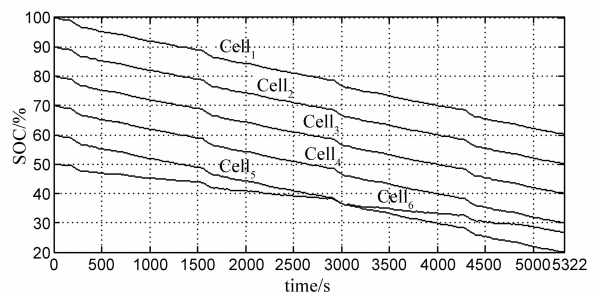


图5 第1次放电时各单体电池的SOC曲线

以 SOC_1 为各单体电池的初始 SOC 值进行充电实验,充电电流为 20A. 充电时对 SOC 值最高的单体电池 $Cell_1$ 进行均衡放电,其均衡电流波形如图 6 所示,其最大值为 5.4A. 充电过程中各个单体电池的 SOC 变化曲线如图 7 所示,均衡时间为 5000s,均衡结束时各单体电池的 SOC 值分别为 100%、94.5%、84.4%、74.3%、64.35% 和 71.5%, 记为 SOC_2 .

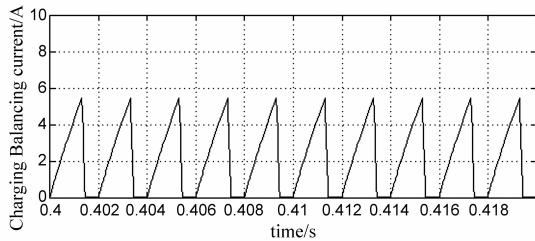


图6 电池组充电时的均衡电流波形

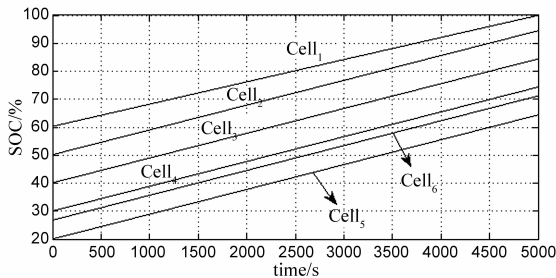


图7 第1次充电时各单体电池的SOC曲线

(2)第2次充放电循环实验

以 SOC_2 为各单体电池的初始 SOC 值进行第 2 次放电实验,放电时对 SOC 值最低的单体电池 $Cell_5$ 进行均衡充电. 放电过程中各个单体电池的 SOC 变化曲线如图 8 所示,均衡时间为 6950s,均衡结束时各单体电池的 SOC 值分别为 48.5%、42.8%、32.6%、22.5%、35% 和 20%, 记为 SOC_3 .

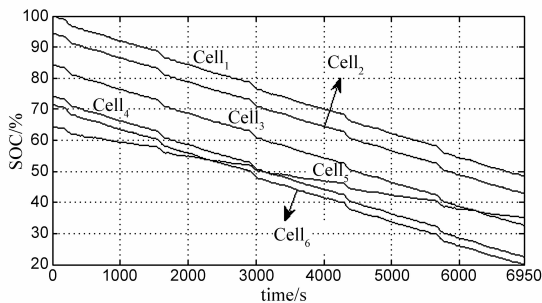


图8 第2次放电时各单体电池的SOC曲线

以 SOC_3 为各单体电池的初始 SOC 值进行第 2 次充电实验,充电时对 SOC 值最高的单体电池 $Cell_1$ 进行均衡放电. 充电过程中各个单体电池的 SOC 变化曲线如图 9 所示,均衡时间为 6460s,均衡结束时各单体电池的 SOC 值分别为 99.9%、100%、89.8%、79.7%、92.3% 和 77.4%, 记为 SOC_4 .

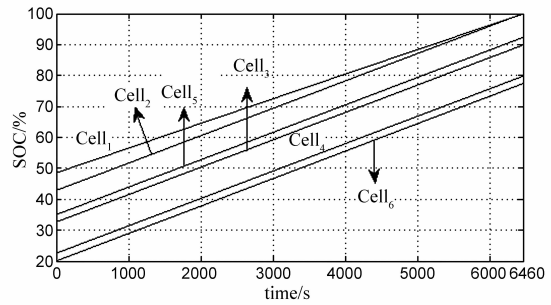


图9 第2次充电时各单体电池的SOC曲线

(3)第3次充放电循环实验

以 SOC_4 为各单体电池的初始 SOC 值进行第 3 次放电实验,放电时首先对 SOC 值最低的单体电池 $Cell_6$ 进行均衡充电,经过 5000s 后,通过开关切换停止对 $Cell_6$ 均衡充电,而对 $Cell_4$ 进行均衡充电. 放电过程中各个单体电池的 SOC 变化曲线如图 10 所示,均衡时间为 9324s,均衡结束时各单体电池的 SOC 值分别为 30.3%、30.3%、20%、24.5%、22.4% 和 22.7%, 记为 SOC_5 .

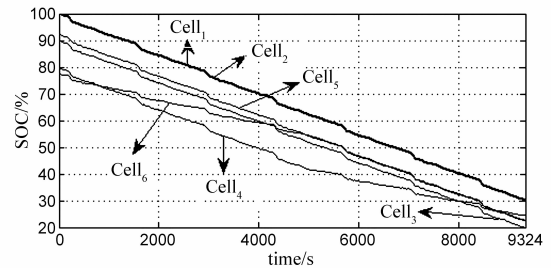


图10 第3次放电时各单体电池的SOC曲线

以 SOC_5 为各单体电池的初始 SOC 值进行第 3 次充电实验,由于单体电池 $Cell_1$ 和 $Cell_2$ 的 SOC 值相当,同时两个单体电池相邻,因此同时对两单体电池进行均衡放电,因此需要控制下电池的充电开关 A_3 和 B_7 一直导通,而对开关 B_1 进行 PWM 控制,其导通占空比调整为 25%. 充电过程中各个单体电池的 SOC 变化曲线如图 11 所示,均衡时间为 8232s,均衡结束时各单体电池的 SOC 值分别为 100%、100%、93.3%、97.8%、95.7% 和 96.1%, 记为 SOC_6 .

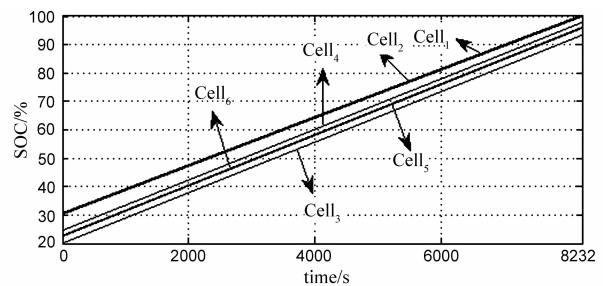


图11 第3次充电时各单体电池的SOC曲线

3.2 仿真结果分析

对 6 个串联的锂离子电池进行了 3 次充放电均衡循环实验,包含六个均衡实验,每个均衡实验中各单体电池的 SOC 变化曲线如图 5、图 7、图 8、图 9、图 10 和图 11 所示. 每个均衡实验的时间、被均衡的单体电池以及实验结束时各单体电池的 SOC 值如表 1 所示.

从电池组充放电的时间分析:在相同的放电停止条件下,第 1 次放电时间为 5322s,第 2 次放电时间为 6950s,第 3 次放电时间为 9324s,每次放电时间依次增加,因此电池组的放电容量明显提高;在相同的充电停止条件下 3 次充电时间也依次增加,因此电池组的充电容量明显提高.

表 1 仿真实验数据

	Cell ₁	Cell ₂	Cell ₃	Cell ₄	Cell ₅	Cell ₆	balanced	time/s
SOC ₀	100%	90%	80%	70%	60%	50%	—	—
SOC ₁	60.3%	50.2%	40.1%	30%	20%	26.7%	Cell ₆	5322
SOC ₂	100%	94.5%	84.4%	74.3%	64.35%	71.5%	Cell ₁	5000
SOC ₃	48.5%	42.8%	32.6%	22.5%	35%	20%	Cell ₅	6950
SOC ₄	99.9%	100%	89.8%	79.7%	92.3%	77.4%	Cell ₁	6460
SOC ₅	30.3%	30.3%	20%	24.5%	22.4%	22.7%	Cell _{6,4}	9324
SOC ₆	100%	100%	93.3%	97.8%	95.7%	96.1%	Cell _{1,2}	8232

从被均衡的单体电池分析:充电均衡时,电池组中能量最高的单体电池被均衡放电,均衡放电电流如图 6 所示,其充电电流减小;放电均衡时,电池组中能量最低的单体电池被均衡充电,均衡充电电流波形如图 12 所示,因此其放电电流减小. 这样不仅能够快速有效的提高整个电池组的充、放电容量,而且有利于电池的健康使用.

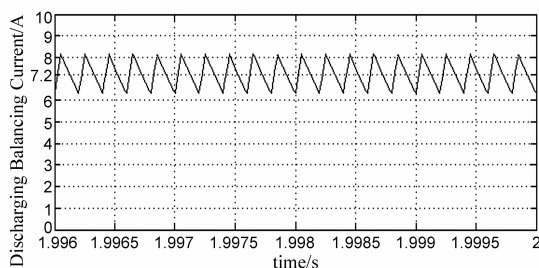


图12 电池组放电时的均衡电流波形

从电池组中各单体电池间的能量差异分析,各单体电池的初始 SOC 值的最大差值为 50%. 通过表 1 可以得到:第 1 次充放电循环均衡实验结束时,单体电池间 SOC 值的最大差值为 35.65%;第 2 次充放电循环均衡实验结束时单体电池间 SOC 值的最大差值为

22.6%;第 3 次充放电循环均衡实验结束时单体电池间 SOC 值的最大差值为 6.7%. 单体电池间 SOC 值差异随着均衡充放电循环次数的增加而逐渐降低,最终会趋于一致.

4 磷酸铁锂电池均衡实验

以实验室现有的磷酸铁锂电池 LiFePO₄ 作为研究对象,单体电池的标称电压为 3.2V,额定容量为 60Ah,初始 SOC 值分别为 29.5%、21%、21% 和 11%. 均衡实验中采用电动势法估算每个单体电池的 SOC 值. 均衡实验前需要通过恒电流充放电配合短时间静置的方式提取磷酸铁锂单体电池的充放电 E-SOC 曲线,然后取平均值得到单体电池的 E-SOC 曲线. 而充电、放电实验中的单体电池的端电压是在静置后通过 LTC6802 测量的,然后根据 E-SOC 曲线得到对应的 SOC 值.

4.1 充电和放电均衡实验

以初始 SOC 值分别为 29.5%、21%、21% 和 11% 的四个串联的磷酸铁锂电池组成的电池组进行充电实验,充电电流为 10A 的恒定电流. 充电截止条件为:电池组 SOC 值达到 80% 时停止充电. 充电过程中,对单体电池 Cell₁ 进行均衡放电,均衡放电电流为 2.2A. 均衡实验中四个单体电池的 SOC 变化曲线如图 13 所示,均衡时间为 12660s,充电实验结束时各单体电池的 SOC 值分别为 80%、79.5%、79.5% 和 70%.

以初始 SOC 值分别为 80%、79.5%、79.5% 和 70% 的四个串联的磷酸铁锂电池组成的电池组进行放电实验,放电电流为 10A 的恒定电流. 放电截止条件为:电池组 SOC 值下降到 10% 时停止放电. 放电过程中,4 号单体电池 Cell₄ 进行均衡充电,均衡充电电流为 1.5A. 四个单体电池的 SOC 变化曲线如图 14 所示,均衡时间为 14700s,放电实验结束时各单体电池的 SOC 值分别为 12%、11.5%、11.5% 和 11%.

4.2 实验结果分析

对四个串联的磷酸铁锂电池进行了一次充放电循环实验,放电实验和充电实验中的四个单体电池的 SOC 变化曲线如图 13 和图 14 所示. 充放电均衡实验的时间、被均衡的单体电池以及实验结束时各单体电池的 SOC 值如表 2 所示.

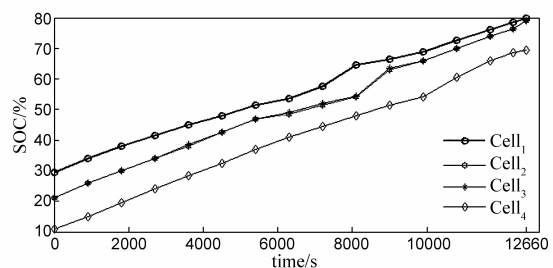


图13 充电实验中各单体电池SOC变化曲线

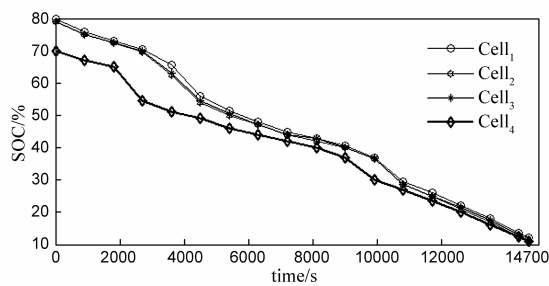


图14 放电实验中各单体电池SOC变化曲线

表2 实验数据

	Cell ₁	Cell ₂	Cell ₃	Cell ₄	balanced	time/s
初始 SOC	29.5%	21%	21%	11%	—	—
充电 SOC	80%	79.5%	79.5%	70%	Cell ₁	12660
放电 SOC	12%	11.5%	11.5%	11%	Cell ₄	14700

四个串联的单体电池的初始 SOC 值分别为 29.5%、21%、21% 和 11%，单体电池间的 SOC 值的最大差值为 18.5%。经过一个循环的充放电均衡实验，四个单体电池的 SOC 值分别为 12%、11.5%、11.5% 和 11%，单体电池间的 SOC 值的最大差值为 1%。可见，通过充、放电均衡，各单体电池间的能量趋于一致，而且整个电池组的充、放电容量明显提高。

5 结论

本文提出了一种新的均衡器拓扑电路，根据电池的工作状态采取两种不同的均衡策略。均衡电路工作时，只需对一个开关进行 PWM 控制，其它两个开关器件一直处于导通状态，因此开关损耗小、均衡电流易控。

本文首先进行了仿真实验，在此基础上以实验室现有的额定容量为 60Ah 的四个串联的磷酸铁锂电池进行充放电均衡实验。仿真实验结果和实际实验结果均证明了此均衡器能够明显改善串联锂离子单体电池间能量的不一致程度，使串联成组的锂离子电池组的充放电容量明显提高。

此均衡器可用于锂离子纯电动汽车，也可用于大规模锂离子蓄电池储能系统。实际使用中，为了降低均衡器功耗，尽量选择额定电压低、导通电阻小的 MOS-FET 器件和导通电阻小的肖特基二极管。

参考文献

[1] 刘红锐,夏超英.一种新型的电动车用电池均衡方法探讨[J].汽车工程,2013,35(10):934-938.
LIU Hong-rui, XIA Chao-ying. An investigation into a new balancing solution for electric vehicles [J]. Automotive En-

gineering, 2013, 35(10):934-938. (in Chinese)

- [2] LIU Hong-rui, XIA Chao-ying. An active equalizer serially connected lithium-ion battery cells [A]. The 2nd International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment [C]. Guilin, China: Trans Tech Publications Ltd Press, 2013:541-544.
- [3] HSIEH Y C, WU J L, CHEN X H. Class-E-based charge-equalization circuit for battery cells [J]. IET Power Electronics, 2012, 5(7):978-983.
- [4] 刘红锐,夏超英.串联锂离子电池斜坡电流均衡器[J].电力电子技术,2014,48(2):85-86,89.
LIU Hong-rui, XIA Chao-ying. A ramp equalizer for serially connected lithiumion battery [J]. Power Electronics, 2014, 48(2):85-86,89. (in Chinese)
- [5] 熊永华,杨艳,等.基于SOC的锂动力电池多层双向自均衡方法[J].电子学报,2014,42(4):766-773.
XIONG Yong-hua, YANG Yan, et al. Multi-level bi-directional active equalization method in lithiumion power battery based on state-of-charge [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(4):766-773. (in Chinese)
- [6] MARKUS Einhorn, WERNER Roessler, JUERGEN 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.
- [7] LIN Faa-jeng, HUANG Ming-shi, HUNG Ying-chi. Takagi-Sugeno-Kang type probabilistic fuzzy neural network control for grid-connected LiFePO₄ battery storage system [J]. IET Power Electronics, 2013, 6(6):1029-1040.
- [8] PETER Pradeep K, AGARWAL Vivek. Analysis and design of a group isolated switched capacitor DC-DC converter [A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics [C]. Bari, Italy: IEEE Press, 2010. 632-637.
- [9] IMTIAZ A M, KHAN F H. Time shared flyback converter based regenerative cell balancing technique for series connected li-ion battery strings [J]. IEEE Transactions on Power Electronic, 2013, 28(12):5960-5975.
- [10] CAO Jian, NIGEL Schofield, ALI Emadi. Battery balancing methods: a comprehensive review [A]. Proceedings of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference [C]. Harbin, China: IEEE Computer Society, 2008. 1-6.
- [11] WANG Liye, WANG Lifang, LIAO Chenglin. Based on energy transferring for battery packs applied on electric vehicle [A]. Proceedings of International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering [C]. Chengdu, China: IEEE Computer Society, 2010. 271-274.
- [12] LEE Yuang-shung, CHENG Mingwang. Intelligent control

battery equalization for series connected lithium-ion battery strings [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,

2005,52(5):1297-1307.

作者简介



刘红锐 女,1982年8月出生,山东德州人.现为昆明理工大学电力工程学院讲师,研究生导师.主要研究方向为电力电子与电力传动、电动汽车电池管理系统.
E-mail:liuhongr888@163.com



李园专 男,1991年1月出生,云南昆明人.现为昆明理工大学电力工程学院硕士研究生.主要研究方向为电池管理系统.
E-mail:911423161@qq.com



陈仕龙(通信作者) 男,1972年12月出生,四川雅安人.现为昆明理工大学电力工程学院副教授,研究生导师,主要研究方向为高压直流输电.
E-mail:chenshilong3@126.com