

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306735

动力电池分层均衡控制研究*

汤祥宇 陆华才

(安徽工程大学电气传动与控制安徽省重点实验室 芜湖 241000)

摘要:提出一种分层均衡电路,用于解决锂离子电池在串联成组时,由于单体电池的不一致性,产生的部分电池过充和过放的问题。分层均衡电路以单体电池荷电状态(state of charge, SOC)值作为均衡变量,将电池组分为3个小组,组内进行基于Buck变换器的均衡;在各小组之间搭建Buck-Boost电路,进行组间均衡。组内均衡与组间均衡相结合,提高了均衡效率。在MATLAB/Simulink平台搭建的仿真结果表明,相对于基于Buck变换器和基于Buck-Boost变换器的均衡电路,分层均衡电路在静置、充电和放电3种工况下,均衡时间相比基于Buck的均衡电路分别降低了21%、18%和30%,相比基于Buck-Boost的均衡电路分别降低了17%、29%和15%。电池组的均衡实验表明,该电路提高了单体电池一致性,能将电池组SOC值极差控制在0.1%以内,解决部分电池过充和过放问题,同时提高了均衡效率。

关键词: 锂电池; Buck变换器; Buck-Boost变换器; 分层均衡

中图分类号: TM912; TN108.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 480.40

Research on hierarchical equalization control of power battery

Tang Xiangyu Lu Huacai

(Key Laboratory of Electric Drive and Control of Anhui Province, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: A hierarchical equalization circuit is proposed to solve the problem of partial over charge and over discharge of lithium-ion battery, due to the inconsistency of single battery in series group. The hierarchical equalization circuit takes the state of charge (SOC) value of single battery as equalization variable, divides battery pack into three groups, and carries out equalization based on Buck converter within the group; Buck-Boost circuit was built between each group to realize bidirectional flow of electricity between groups and balance between groups. The combination of intra-group balancing and inter-group balancing improves the balancing efficiency. The simulation results built on MATLAB/Simulink platform show that compared with the equalization circuit based on Buck converter and Buck-Boost converter, the hierarchical equalization circuit can operate under static, charging and discharging conditions, compared with Buck-based equalization circuits, the equalization time is reduced by 21%, 18% and 30%, respectively, and compared with Buck-Boost equalization circuits, the equalization time is reduced by 17%, 29% and 15%, respectively. The equalization experiment of the battery pack shows that the circuit can improve the consistency of these single batteries, control the SOC value range of the battery pack within 0.1%, solve the problem of overcharge and over discharge of partial batteries, and improve the equalization efficiency.

Keywords: lithium-ion battery; Buck converter; Buck-Boost converter; hierarchical equalization

0 引言

锂离子电池在能量密度、可用容量和放电电压稳定性等方面,相比于铅酸电池具有显著优势,现广泛应用于

电动汽车和电网储能等领域^[1-3]。单体电池电压较低,需要串联成组提高电池组放电电压,但由于生产工艺、环境温度和运行工况等因素影响^[4],单体电池间存在容量与荷电状态的不一致性。单体电池的不一致性会经多次充放电放大,造成部分单体电池的过充和过放,过充和过放

会使电极附近出现锂结晶^[5-6],容易刺穿隔膜发生短路,形成安全隐患。因此,电池均衡在电池使用寿命的延长和安全性的提升方面意义重大^[7]。

目前,电池均衡技术分为主动均衡和被动均衡。被动均衡以电阻为均衡元件,将荷电状态较高的电池电能以热能的形式耗散出去,属于能耗型均衡^[8-9]。被动均衡结构简单、成本低,但存在能量利用率低、易在高温状态下引起电池组热失控问题。主动均衡的均衡元件主要包括电容、电感、变压器和 DC-DC 变换器,各单体电池间通过储能元件将电荷进行转移,属于转移型均衡^[10-13]。基于电容的均衡,体积小,均衡速度慢;基于电感的均衡,体积大,均衡速度快,但控制复杂。基于变压器的均衡可实现任意单体电池间的能量流动,但体积较大,成本高^[14-17]。基于 DC-DC 变换器的均衡也可实现任意单体电池间的能量流动,元件数量少,结构简单,但当单体电池数量较多时,均衡速度会有较明显的下降^[17-20]。

文献[8]提出了一种基于自适应选择的主被动均衡拓扑,该电路能够根据单体电池的 SOC 值,实现主动均衡与被动均衡的自适应选择,利用集中式均衡拓扑,减少了 DC-DC 变换器的数量,简化了电路结构,但当串联单体电池数量较多时,均衡效率将会降低。文献[14]提出了一种基于三绕组变压器的多均衡类型方案,该电路可实现单体电池与单体电池之间、电池组与单体电池之间任意方向的电能转移,电路灵活性高,均衡路径短,但以变压器作为储能元件,体积较大,不利于均衡电路的集成化。文献[18]提出了一种基于隔离型半桥变换器的均衡方案,该电路将开关阵列与隔离型双半桥变换器结合,减少了开关的数量,降低了均衡电路的体积和成本,且隔离型双半桥变换器具有良好的电压电流输出特性,但也存在随着单体电池数量的增加,整体均衡效率降低的问题。

为了提高均衡效率,简化结构,防止电池单体的过充和过放,本文在基于 Buck 变换器的均衡电路的基础上,结合 Buck-Boost 均衡电路,提出了一种新型的分层均衡拓扑结构,该结构分为组内均衡和组间均衡。经仿真实验验证,此方案具有结构简单,均衡效率高和电池组一致性高的优点。

1 均衡拓扑结构及工作原理

传统基于 Buck 变换器的均衡电路使用电感作为储能元件,通过控制 MOS 管的通断实现电荷的转移。Buck 变换器为降压斩波器件,其输出特性受电感 L 、电容 C 及 MOS 管控制信号的开关频率影响。电路的输出电压值由控制信号的占空比决定,占空比提高则输出电压值升高,电池的充电电压升高,均衡速度加快。当 n 节单体电

池串联成组时,Buck 变换器的输入端连接电池组的正负极,输出端连接 SOC_{\min} 单体电池的正负极,将整个电池组的电荷转移到单体电池中。此均衡方案可实现对任意单体电池的均衡,但输出端只能连接一节电池,随着电池数量的增加,电池组的均衡时间会延长。

传统 Buck-Boost 均衡电路可实现相邻电池间的电荷转移,当电池间的 SOC 差值达到均衡开启条件时,可将高电量电池电荷向低电量电池转移。Buck-Boost 变换器即可升压也可降压,输入输出电压极性相反,电感 L 影响输出纹波大小,电容 C 起到滤波作用。电路的输出电压值同样由控制信号的占空比决定,可根据均衡速度的需要及电路中电流的大小合理设置占空比,达到电路安全性与均衡速度的平衡。此均衡方案在相邻单体间的能量传递效率较高,但随着电池数量的增加,若串联电池组分别位于首尾两处的单体电池 SOC 差值较大,电荷需要经相邻电池逐级传递,均衡时间延长,能量传递效率下降。

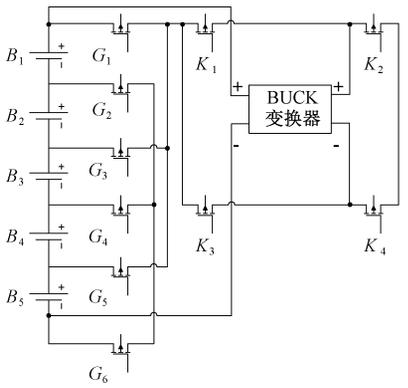
为解决在电池组中单体电池数量较多时,传统基于 Buck 变换器的均衡电路均衡时间长,以及传统 Buck-Boost 均衡电路能量传输路径长、效率低的问题,本文将以上两种均衡电路相结合,提出了分层均衡拓扑结构和均衡策略。Buck 变换器应用于组内均衡,以 5 节电池成一小组,组内电池数量较少,均衡时间较短;Buck-Boost 均衡电路应用于组间均衡,串联的 3 个电池组可以直接进行相邻组间和首尾组间的电荷转移。两种方案的结合,既可以缩短均衡时间,也降低了能量传输的损耗,且不会影响均衡精度。

1.1 均衡拓扑结构

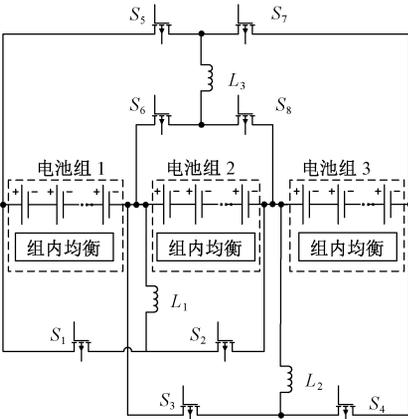
分层均衡拓扑结构如图 1 所示。图 1(a)为组内均衡拓扑结构,可实现电池组对任意单体电池的充电,Buck 变换器的输出端与由 $K_1 \sim K_4$ 组成的开关桥相连接,控制输出端正负极与待充电单体电池正负极的匹配。开关桥结构的使用,相比较于传统的开关组,无需在每个单体电池两端都连接开关,降低了开关数量,简化了电路结构。图 1(b)为组间均衡拓扑结构,相邻电池组使用传统 Buck-Boost 均衡电路的连接方式,首尾两电池组间使用 H 桥式均衡电路,可实现相邻电池组和首尾两端电池组的电荷转移,不需要通过中间电池组传递能量,降低了均衡损耗。

1.2 均衡工作原理

组内均衡原理及电荷转移路径如图 2 所示。结合图 1(a)和图 2,假设单体电池 B_4 的 SOC 值最小,Buck 变换器输入端与串联电池组整体的正负极连接,电荷经回路 1 流进 Buck 变换器输入端;单体电池 B_4 两端 MOS 管 G_4 和 G_5 导通,Buck 变换器输出端的 K_2 和 K_3 导通,变换器通过输出端开关桥的选通与单体电池两端开关组的选



(a) 组内均衡拓扑结构
(a) Intra-group balancing topology



(b) 组间均衡拓扑结构
(b) Inter-group balancing topology

图 1 分层均衡拓扑结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the hierarchical equalization topology

通,实现正负极的对接,电荷经回路 2 进入电池 B_4 ,完成电荷的转移。

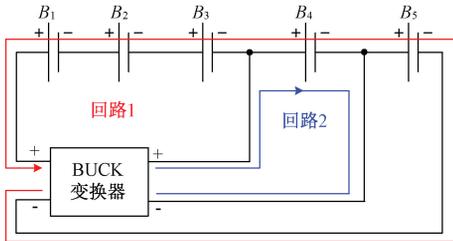
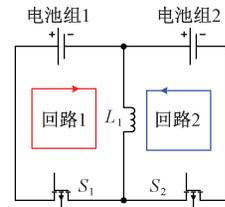


图 2 组内均衡原理

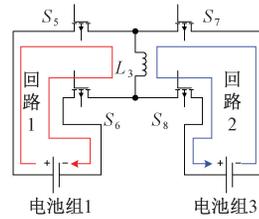
Fig. 2 Schematic diagram of intra-group equilibrium

组间均衡原理及电荷转移路径如图 3 所示。结合图 1(b)和图 3(a),为相邻电池组之间的组间均衡,假设电池组 1 的 SOC 平均值高于电池组 2, MOS 管 S_1 导通, S_2 关断, 电池组 1 通过回路 1 向电感 L_1 充电, 之后 S_1 关断, S_2 导通, 电感 L_1 通过回路 2 向电池组 2 充电, 均衡过程完成。结合图 1(b)和图 3(b),为首尾两端电池组之间的组间均衡,假设电池组 1 的 SOC 平均值高于电池组 3,

MOS 管 S_5 和 S_6 同时导通, S_7 和 S_8 同时关断, 电池组 1 通过回路 1 向电感 L_3 充电, 之后 S_5 和 S_6 同时关断, S_7 和 S_8 同时导通, 电感 L_3 通过回路 2 向电池组 3 充电, 均衡过程完成。



(a) 相邻电池组均衡
(a) Equalization of adjacent battery packs



(b) 首尾电池组均衡
(b) Equalization of front and rear battery packs

图 3 组间均衡原理

Fig. 3 Schematic diagram of inter-group equilibrium

2 均衡策略

均衡策略的制定首先要确定均衡变量。鉴于 SOC 值处于 0 ~ 20% 和 80% ~ 100% 区间时, 开路电压 (open circuit voltage, OCV) 曲线变化较大, 开路电压值不适用于单独估计电池的剩余电量, 故采用 SOC 值作为均衡变量。

本文对单体电池 SOC 值的估计, 选择二阶 RC 模型作为电池的等效电路模型, 模型如图 4 所示。其中 U_{ocv} 为开路电压, U_r 为输出电压, I_L 为电流, R_0 为电池内阻, R_1C_1 和 R_2C_2 共同代表电池的极化效应, U_0 、 U_1 和 U_2 分别表示各元件的电压。使用带遗忘因子的递推最小二乘法, 结合电池的混合动力脉冲特性测试 (hybrid pulse power characterization, HPPC) 数据, 即可对图 4 中的电池参数进行辨识, 获得准确的模型参数。在二阶 RC 模型的基础上, 使用扩展卡尔曼滤波 (extended Kalman filter, EKF) 算法进行非线性系统建模, 即可完成对单体电池 SOC 值的在线估计, 估计值与真实值的误差可控制在约 3% 以内, 可以满足均衡电路和均衡策略的要求。

分层均衡分为组内均衡和组间均衡, 其中组内均衡与组间均衡互不干扰, 组内均衡实现单体电池之间的均衡, 组间均衡实现电池组间的均衡。组内均衡需要估计各单体电池的 SOC 值、对组内单体 SOC 值进行排序、计

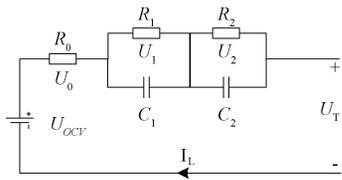


图 4 二阶 RC 模型

Fig. 4 Second-order RC model

算组内 SOC 极差、确定组内均衡开启的阈值。

组内均衡控制策略如下：

- 1) 采集单体电池电压、电流等信号，在线估计各电池 $SOC_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 值；
- 2) 将各单体电池 SOC_i 值按降序排列，找出最小值 SOC_{min} 和最大值 SOC_{max} ；
- 3) 判断 SOC_{min} 与 SOC_{max} 的差值是否小于 0.05%，若是，则均衡不启动，若否，则进入步骤 4)；
- 4) SOC_i 值极差大于 0.05%，均衡启动，电池组通过 Buck 变换器向 SOC_{min} 单体充电；
- 5) 计算单体电池 SOC 平均值 SOC_{av} ，并判断此时 SOC_{av} 与 SOC_{min} 的差值是否小于 0.02%，若是，则此单体电池均衡结束，若否，继续充电；
- 6) 间隔 1 s，进入下一次循环，继续执行步骤 1)~5)。

组内均衡控制策略可以完成充电过程中防止最高荷电状态单体电池过充，放电过程中防止最低荷电状态单体电池过放，以及静置过程中的单体电池电量平均分配的设计目标，且 SOC 极差控制在 0.05% 以内，均衡精度较高，均衡算法流程如图 5 所示。

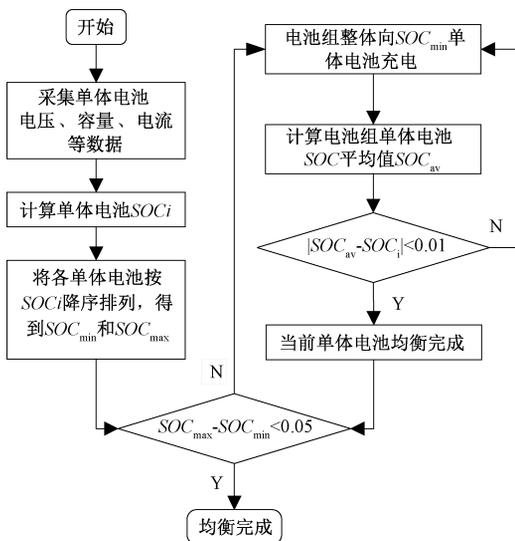


图 5 组内均衡算法流程

Fig. 5 Flow chart of intra-group equalization algorithm

均衡估计出的单体 SOC 值，需要计算各电池组的平均 SOC 值、对电池组 SOC 值进行排序、计算组间 SOC 平均值的极差、确定组间均衡开启的阈值。

组间均衡控制策略如下：

- 1) 采集组内单体电池 SOC 值，并计算各电池组 SOC 平均值；
- 2) 将各电池组 SOC 平均值按降序排列，找出最小值 SOC_{avmax} 、中间值 SOC_{avmid} 和最大值 SOC_{avmin} ；
- 3) 判断 SOC_{avmax} 与 SOC_{avmin} 的差值是否小于 0.1%，若是，则均衡不启动，若否，则进入步骤 4)；
- 4) 判断电池组是否处于充电工况，若是，则执行步骤 5)；若否，则执行步骤 6)；
- 5) 判断电池组是否处于充电状态，若是，则执行步骤 6)；若否，则执行步骤 7)；
- 6) 高电量电池组分别向中电量与低电量电池组充电，并判断 SOC_{avmax} 与 SOC_{avmid} 的差值是否小于 0.05%，若是，则高电量与中电量电池组同时向低电量电池组充电；若否，则高电量与中电量电池组同时向低电量电池组充电；
- 7) 高电量与中电量电池组同时向低电量电池组充电，并判断 SOC_{avmid} 与 SOC_{avmin} 的差值是否小于 0.05%，若是，则高电量与中电量电池组同时向低电量电池组充电；若否，则高电量与中电量电池组同时向低电量电池组充电；
- 8) 判断 SOC_{avmin} 与 SOC_{avmax} 的差值是否小于 0.1%，若是，则均衡不启动，若否，则进入步骤 4)；
- 9) 间隔 1 s，进入下一次循环，继续执行步骤 1)~8)。

组间均衡控制策略可以实现任意两组电池组间能量的双向流动，避免了首尾两电池组均衡时需要借助中间电池组的问题，降低了均衡过程中的能量损耗。充电工况下，高电量电池组向中、低电量电池组充电，降低了高电量电池组的充电速度，可以防止高电量电池组的过充；放电工况下，高、中电量电池组同时向低电量电池组充电，减缓低电量电池组的放电速度，可以防止低电量电池组的过放。静置工况下的工作原理与放电工况相同。两个电池组可同时向一个电池组充电，均衡速度将显著提高，且组间 SOC 极差控制在 0.1% 以内，均衡精度较高，均衡算法流程如图 6 所示。

将组内均衡与组间均衡相结合，本文提出了分层均衡方案。该方案体现了两种均衡方案的优点，均衡过程的前半阶段，组内均衡与组间均衡同时工作，快速实现了组内均衡，均衡电流大，均衡速度快，且同时做到了防止单体电池和电池组过充和过放问题。均衡过程的后半阶段，主要是组间均衡工作，任意电池组之间可实现电荷转移，避免了经中间电池转移电荷产生的损耗问题，且组内均衡可实现中、高电量电池组同时向低电量电池组充电，

组间均衡建立在组内均衡的基础上，直接使用组内

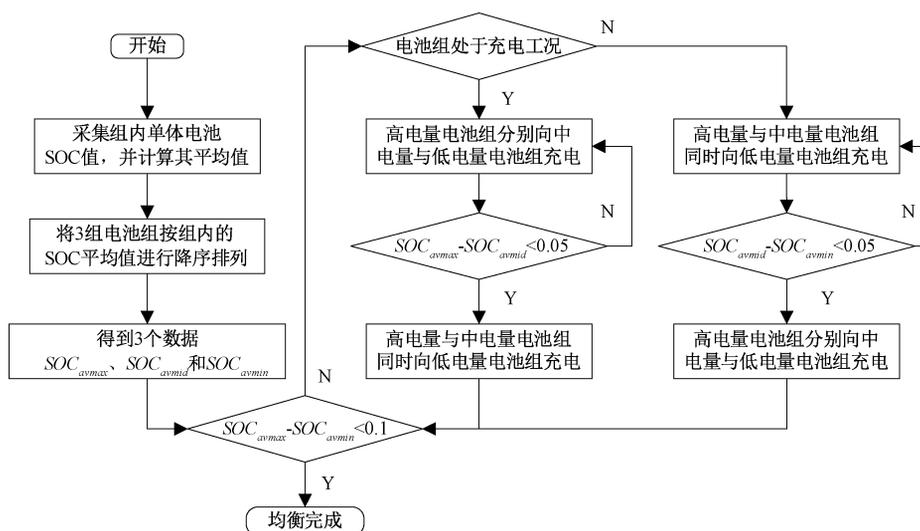


图 6 组间均衡算法流程

Fig. 6 Flow chart of inter-group equalization algorithm

提高了均衡速度。

3 仿真结果及分析

为验证本文提出的一种基于 Buck 变换器和 Buck-Boost 变换器相结合的分层均衡电路,以 15 节单体电池串联成组作为实验对象,平均分为 3 个小组,在 MATLAB/Simulink 平台搭建模型进行仿真实验。对比试验为基于 Buck 变换器的均衡电路和基于 Buck-Boost 变换器的均衡电路。

仿真模型主要由电池组模块、开关组模块、Buck 变换器、Buck-Boost 模块、均衡控制模块和外接充放电模块组成。其中电池组模块的 15 节单体电池的额定电压均为 3.6 V,额定容量为 20 Ah,电池内阻为 13 mΩ,初始 SOC 值分别为 64%、68%、70%、69%、65%、66%、63%、67.5%、66.5%、62%、60%、62.7%、63.4%、64.6%、61.6%,SOC 值的极差为 10%。MOS 管的内阻为 10 mΩ,开关频率设为 10 kHz,脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 占空比设置为 50%,电感的取值为 0.1 H。外接充电电源为恒压直流电源,电压为 120 V,外接放电电阻为 200 Ω。

3.1 静置均衡

静置工况下,电池组与外接充放电模块断开,电路无充电电源和负载。基于 Buck 变换器的均衡电路中,电池组自身作为 Buck 变换器的输入端,输出端针对最低电量的单体开始均衡。基于 Buck-Boost 的均衡电路对相邻单体电池进行均衡。分层均衡电路中,各小组通过 Buck 变换器对组内最低电量单体开始均衡,电池组间通过 Buck-Boost 变换器实现组与组之间的电荷转移。3 种均衡方案

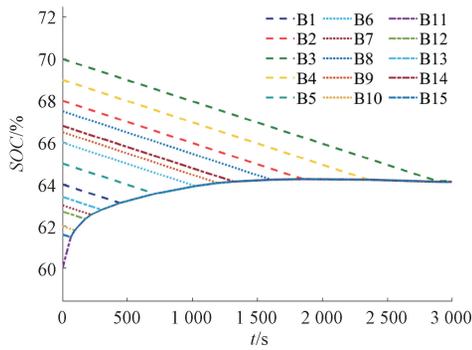
的均衡结果对比效果如图 7 所示,同一组电池使用同一种线形,不同组电池间使用不同种线形。

静置均衡实验中,相比于基于 Buck 变换器的均衡方案,分层均衡的组内均衡部分将单体电池总数与被均衡单体数之比从 15 : 1 降低到了 5 : 1,各分组分别在 540、625、725 s 内完成了 3 个电池组的组内均衡,组内均衡速率较高。组间 Buck-Boost 均衡电路参与了电池均衡的全过程,对高、低电量电池组的组内均衡有一定的积极作用,组间均衡在 2 288 s 完成,相比于基于 Buck 变换器均衡电路的 2 882 s,均衡时间减少了 594 s,速度提高了 21%;相比于基于 Buck-Boost 变换器均衡电路的 2 758 s,均衡时间减少了 470 s,速度提高了 17%。证明了分层均衡方案在静置工况下的优越性。

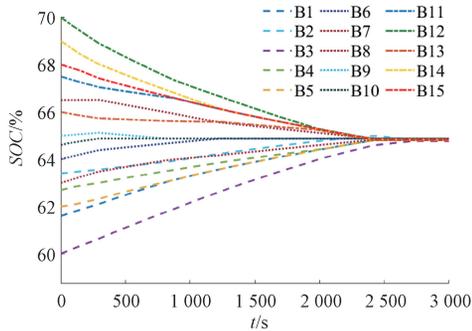
3.2 充电均衡

充电工况下,电池组与外接充电模块相连,120 V 直流电源对电池组进行充电,电池组在吸收能量的同时进行组内与组间均衡。与静置工况下相比,基于 Buck 变换器的均衡电路中,Buck 变换器的输入端与外接直流电源相连,输出端与被均衡单体电池相连,输出更稳定。基于 Buck-Boost 变换器的均衡电路对相邻单体电池进行均衡。分层均衡工作在充电工况下,高电量电池组始终在向低电量或同时向中、低电量电池组转移电荷,有效避免了高电量电池组的过充。3 种均衡方案的均衡结果对比效果如图 8 所示。

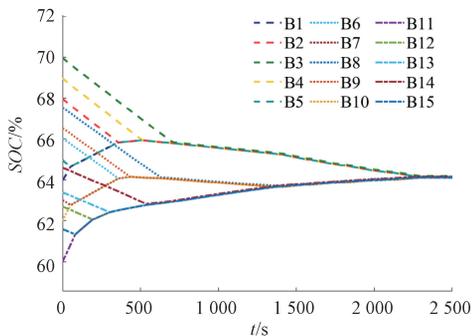
充电均衡实验中,分层均衡的组内均衡部分,各分组分别在 570、626、700 s 完成了 3 个电池组的组内均衡,电池组的组间均衡在 2 350 s 时完成,相比基于 Buck 变换器均衡电路的 2 865 s,均衡时间减少了 515 s,速度提高了 18%;相比于基于 Buck-Boost 变换器均衡电路的 3 327 s,



(a) 基于 Buck 变换器的均衡
(a) Equalization based on Buck converter



(b) 基于 Buck-Boost 变换器的均衡
(b) Equalization based on Buck-Boost converter



(c) 分层均衡
(c) Hierarchical equalization

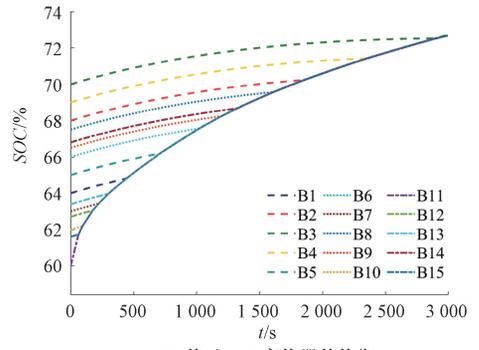
图 7 静置均衡对比

Fig. 7 Comparison diagram of static equalization

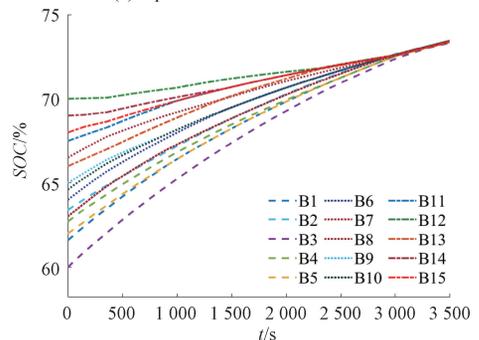
均衡时间减少了 977 s, 速度提高了 29%。证明了分层均衡方案在充电工况下的优越性。

3.3 放电均衡

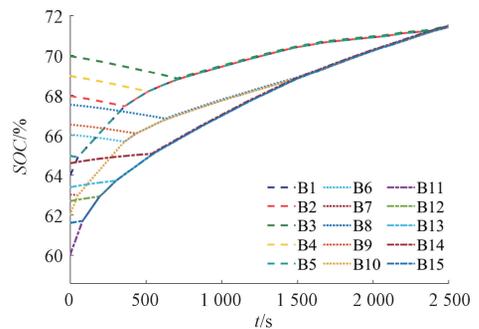
放电工况下, 电池组与外接放电模块相连, 200 Ω 电阻对电池组进行放电, 电池组在消耗能量的同时进行组内与组间均衡。基于 Buck 变换器的均衡电路始终在最低单体电池转移电荷, 防止电池过放。基于 Buck-Boost 变换器的均衡电路对相邻单体电池进行均衡。分层均衡工作在放电工况下, 低电量电池组始终在接收高电量电池组或同时接收高、中电量电池组转移的电荷, 有效避免了低电量电池组的过放。3 种均衡方案的均衡结果对比效果如图 9 所示。



(a) 基于 Buck 变换器的均衡
(a) Equalization based on Buck converter



(b) 基于 Buck-Boost 变换器的均衡
(b) Equalization based on Buck-Boost converter



(c) 分层均衡
(c) Hierarchical equalization

图 8 充电均衡对比

Fig. 8 Comparison diagram of charge equalization

放电均衡实验中, 分层均衡的组内均衡部分, 各分组分别在 538、627、704 s 完成了 3 个电池组的组内均衡, 电池组的组间均衡在 2 022 s 时完成, 相比基于 Buck 变换器均衡电路的 2 900 s, 均衡时间减少了 878 s, 速度提高了 30%; 相比基于 Buck-Boost 变换器均衡电路的 2 387 s, 均衡时间减少了 365 s, 速度提高了 15%。证明了分层均衡方案在放电工况下的优越性。

4 结 论

本文设计了一种基于 Buck 变换器和 Buck-Boost 变换器的分层均衡电路, 用来降低锂离子电池组的各单体

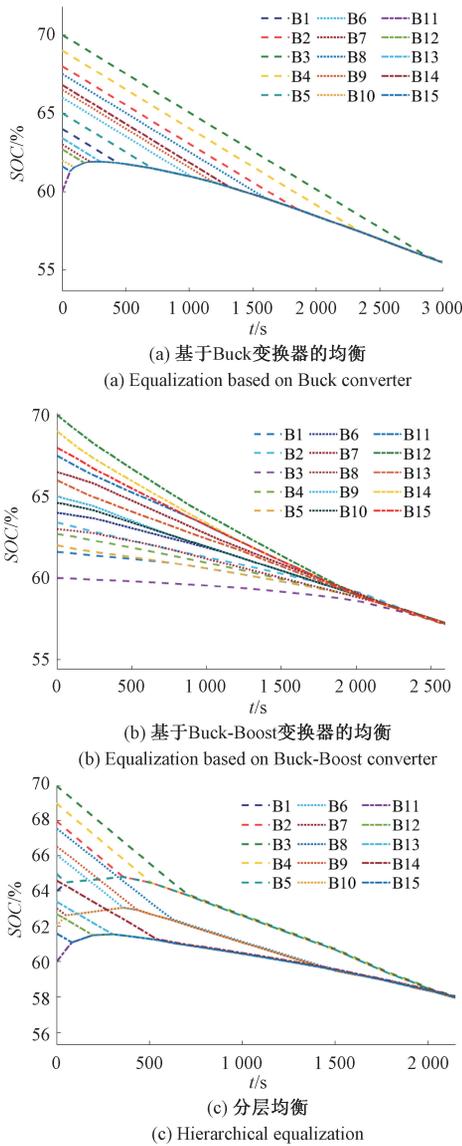


图 9 放电均衡对比

Fig. 9 Comparison diagram of discharge equalization

电池达成一致性所需的时间。该电路针对基于 Buck 变换器的均衡电路在电池组数量较多时,会出现的均衡时间过长的问題,提出将电池组拆分成组,同时进行组内与组间均衡。改进的分层均衡电路,组内单体电池数量较少,使用 Buck 变换器,降低了电池总数与单次可均衡单体电池数之比,在保证较高效率的同时简化了结构;组间均衡使用 Buck-Boost 均衡电路,并在首尾电池组间搭建 H 桥式均衡电路,保证任意两组之间可以之间进行电荷转移,避免了传统 Buck-Boost 均衡电路存在的均衡路径长、效率低的问题。均衡策略以 SOC 作为均衡变量,充电工况下以削峰为原则,放电工况下以填谷为原则。为验证均衡方案的优越性,分别在静置、充电、放电 3 种工况下做了仿真实验,仿真结果表明:该方案可将组内电池

单体 SOC 极差控制在 0.05% 以内,组间电池组平均 SOC 极差控制在 0.1% 之内;3 种工况下均衡速度比基于 Buck 变换器的均衡电路分别提升了 21%、18%、30%,比基于 Buck-Boost 变换器的均衡电路分别提升了 17%、29%、15%,且比传统 Buck-Boost 均衡电路结构更简单。该方案存在组间与组内均衡电路和均衡策略不同的问题,电路较为复杂;若串联电池数量较多时,组内均衡效率会明显降低,影响整体均衡速度。

参考文献

- [1] 孙运志, 蒋德玉, 张盛林, 等. 计及电池寿命损耗的多能源微网储能优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(5): 128-133, 144.
SUN Y ZH, JIANG D Y, ZHANG SH L, et al. Optimal energy-storage configuration of multi-energy microgrid considering battery life degradation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(5): 128-133, 144.
- [2] 王鹿军, 柯锦洋, 詹敏, 等. 基于四管双向变换器的退役电池组有源快速均衡方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5254-5266.
WANG L J, KE J Y, ZHAN M, et al. Active fast equalization method for retired battery pack based on four switch bidirectional converter[J]. Proceeding of the CSEE, 2022, 42(14): 5254-5266.
- [3] LAI X, JIANG C H, ZHENG Y J, et al. A novel composite equalizer based on an additional cell for series-connected lithium-ion cells[J]. Electronics, 2018, 7(12): 366-366.
- [4] SHANG Y L, ZHAO SH F, FU Y L, et al. A lithium-ion battery balancing circuit based on synchronous rectification[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1637-1648.
- [5] YANG Z ZH. Development of an active equalizer for lithium-ion batteries[J]. Electronics, 2022, 11(14): 2219-2219.
- [6] SUN X J, ZHU L ZH, ZHANG P F, et al. Design of active equalizer for lithium-ion battery pack based on double-tiered modular resonance[J]. Systems Science & Control Engineering, 2018, 6(3): 314-323.
- [7] BARRERAS J V, CASTRO R, WAN Y, et al. A consensus algorithm for multi-objective battery balancing[J]. Energies, 2021, 14(14): 4279-4279.
- [8] 刘威, 王友仁, 许煜辰, 等. 基于自适应选择主被动均衡拓扑的机载锂电池电源能量均衡方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 244-252.
LIU W, WANG Y R, XU Y CH, et al. An energy equalization method for airborne lithium battery power supply based on adaptive selection of active and passive

- equalization topology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 244-252.
- [9] LEE D, JEON J, HAN S. Novel cell balancing applied near-field coupling and serial-parallel circuit configuration [J]. Energy Reports, 2023, 9 (S4): 28-33.
- [10] CRISTINA G M, DIEGO F L, LIDIA S A, et al. Battery internal resistance estimation using a battery balancing system based on switched capacitors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5363-5374.
- [11] 吴忠强, 胡晓宇. 基于 STPF 的 SOC 估计及在多锂电池均衡中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 235-244.
WU ZH Q, HU X Y. SOC estimation based on STPF and its application in multi-lithium battery equalization [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2): 235-244.
- [12] WANG X L, CHENG K W E, FONG Y C. Non-equal voltage cell balancing for battery and super-capacitor source package management system using tapped inductor techniques [J]. Energies, 2018, 11(5): 1037-1037.
- [13] 康龙云, 万蕾, 谢缔, 等. 一种开关管复用的电感型串联锂电池均衡电路[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(1): 46-54.
KANG L Y, WAN L, XIE D, et al. Inductive equalizer for series-connected lithium batteries based on reutilizing switches [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(1): 46-54.
- [14] 郑征, 王肖帅, 李斌, 等. 基于三绕组变压器的锂电池组自适应交错控制均衡方案[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(4): 1131-1140.
ZHENG ZH, WANG X SH, LI B, et al. Adaptive interleaved control equalization for lithium-ion battery packs based on three-winding transformers [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(4): 1131-1140.
- [15] 姚芳, 王晓鹏, 陈盛华, 等. 基 Buck-Boost 准谐振电路的电池自适应分组均衡方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 714-727.
YAO F, WANG X P, CHEN SH H, et al. Research on battery adaptive grouping equalization scheme based on Buck-Boost [J]. Quasi-Resonant Circuit, Proceeding of the CSEE, 2023, 43(2): 714-727.
- [16] KOSEOGLOU M, TSIOMAS E, JABBOUR N, et al. Highly effective cell equalization in a lithium-ion battery management system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 2088-2099.
- [17] HAN W J, ZOU CH F, ZHANG L, et al. Near-fastest battery balancing by cell/module reconfiguration [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6954-6964.
- [18] 詹敏, 柯锦洋, 吴铁洲. 基于隔离型半桥变换器的退役电池组均衡方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(17): 7-13.
ZHAN M, KE J Y, WU T ZH. Retired battery equalization method based on isolated half-bridge converter [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(17): 7-13.
- [19] 戴冬冰, 冯冬梅, 张军, 等. 动力电池均衡充放电系统的研究和设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(11): 111-115.
DAI D B, FENG D M, ZHANG J, et al. Research and design of charge-discharge equalization system for power battery [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(11): 111-115.
- [20] 巫春玲, 刘智轩, 程琰清, 等. 动力锂电池组均衡拓扑研究综述[J]. 电子测量技术, 2021, 44(15): 7-14.
WU CH L, LIU ZH X, CHENG Y Q, et al. Review of power lithium battery pack equalization topology [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(15): 7-14.

作者简介



汤祥宇, 2021 年于安徽工程大学获得学士学位, 现为安徽工程大学硕士研究生, 主要研究方向为控制工程与自动化技术。
E-mail: 157424952@qq.com

Tang Xiangyu received a B. Sc. degree from Anhui Polytechnic University in 2021. He is currently a M. Sc. candidate of Anhui Polytechnic University School. His main research interests include control engineering and automation technology.



陆华才 (通信作者), 2005 年于江苏大学获得硕士学位, 2008 年于浙江大学获得博士学位, 现为安徽工程大学教授, 主要研究方向为控制科学与控制工程。
E-mail: luhuacai@163.com

Lu Huacai (Corresponding author) received his M. Sc. degree in 2005 from Jiangsu University, received his Ph. D. degree in 2008 from Zhejiang University. He is currently a professor in Anhui Polytechnic University. His main research interests include measure control science and control engineering.