

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209427

基于隔离型半桥变换器的退役电池组均衡方法^{*}

詹敏 柯锦洋 吴铁洲

(湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室 武汉 430068)

摘要: 在梯次电池储能应用中,梯次电池间存在的较大不一致性使得电池组在充放电过程中更容易出现过充和过放现象,限制了电池组整体的可用容量甚至造成安全隐患。针对该问题,本文提出了一种基于隔离型双半桥 DC-DC 变换器的有源均衡电路。该均衡电路由 $N+5$ 个开关(N 为电池数目)构成的开关阵列和隔离型双半桥 DC-DC 变换器构成,保证了电路的灵活性。在主电路工作原理分析的基础上,进一步提出了一种基于 SOC 的分状态均衡控制策略,在电池组充电、放电和静置三种不同状态下,采用对应的均衡策略实现电池组能量平衡。最后对 5 节串联锂离子电池进行了均衡实验,实验结果表明相比不使用均衡器的电池组,该方法在静置、充电、放电状态下分别提升了 12%, 9.9%, 17.5% 的可用容量,证明了该方法的可行性及有效性。

关键词: 梯次利用电池;有源均衡;开关阵列;隔离型双半桥 DC-DC 变换器;分状态均衡策略

中图分类号: TM912 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.4054

Retired battery equalization method based on isolated half-bridge converter

Zhan Min Ke Jinyang Wu Tiezhou

(Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System,
Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In the energy storage application of retired batteries, the large inconsistency between the retired batteries makes the battery pack more prone to over-charge and over-discharge during the charging and discharging process, which reduces the overall available capacity of the battery pack and even causes safety issues. In order to solve the above problems, an active equalization circuit based on an isolated dual half-bridge DC-DC converter is proposed in this paper. The equalizer circuit consists of a switch array of $N+5$ switches (N is the number of cells) and an isolated dual half-bridge DC-DC converter, which ensures the flexibility of the circuit. Based on the analysis of the working principle of the main circuit, a sub-state equalization control strategy based on SOC is proposed to achieve balancing of the battery pack by using the corresponding equalization strategy under three different states of battery pack: charging, discharging and resting. Finally, an equalization experiment was carried out on 5 series lithium-ion batteries. The experimental results show that the available capacity of this method is increased by 12%, 9.9%, and 17.5% in the resting, charging, and discharging states, respectively, compared with the battery pack without the equalizer, which proves the feasibility and effectiveness of this method.

Keywords: retired batteries; active equalization; switch array; isolated dual half-bridge converter; sub-state equalization strategy

0 引言

电动汽车退役电池容量通常为额定容量的 70%~80%,经过分选后仍可用于对电池性能要求较低的场合,如储能系统、基站备电等^[1-2]。2021年8月,工信部、科技部等五部门联合制定了《新能源汽车动力蓄电池梯次利用管理

办法》鼓励生产适用于基站备电、储能、充换电等领域的梯次产品^[3]。由于退役锂离子电池单体电压较低,在储能系统中使用时往往需要将单体电池以串并联的形式成组使用^[4]。另外,退役电池相比于新电池具有更大的不一致性,传导至电池组必将带来电池组容量的损失,进而造成使用寿命的下降^[5]。因此,研究一种能够实现退役电池快速平

收稿日期:2022-03-28

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51677058)项目资助

衡的均衡方法是解决容量“木桶效应”保证电池组高效安全工作的关键。

目前,电池组的均衡方式一般分为无源均衡和有源均衡两种。无源均衡为能耗型均衡,通过将电压较高的单体电池的多余能量以热能形式耗散掉,以此达到电池组平衡的目的^[6]。然而,该均衡方式存在均衡效率低、能量损耗大等问题,不适用于退役电池的均衡。有源均衡是一种无损均衡,根据能量储存单元的不同可分为电容^[7-8]、电感^[9-10]、变压器^[11-13]以及变换器^[14]4类。通过储能单元与开关元件的相互配合将能量高的单体电池能量转移至能量低的电池中实现电池组平衡。该方式由于均衡效率高,均衡速度快,且不产生热负担,有利于实现电池组安全稳定运行等优点^[15],相比无源均衡更适用于退役电池的均衡。基于电容的均衡方法以电压形式进行电池间的能量转移,从而实现电池组平衡。文献[7]提出了一种开关电容式的均衡电路拓扑,电路结构简单,易于实现。但由于电池间表现的电压差往往相对较低导致电容式均衡的均衡效果较差。基于电感的均衡方法以电感作为储能元件,能量以电流形式进行传递解决了电容式均衡受到电压差影响的缺点,均衡效果更好。文献[9]提出了一种基于电感的均衡方法,采用模糊逻辑控制规划电流路径,提升了均衡速度。然而基于电感的电路拓扑受到能量只能在相邻单元之间传输的限制,导致电路存在效率低和灵活性差等问题。基于变压器的均衡方法采用变压器作为均衡器主体,为实现单体间或单体电池与电池组之间的能量双向流动,每个电池需要一个对应的变压器绕组,成本较高且不利于均衡器的集成化。文献[13]提出了一种基于多绕组变压器的均衡拓扑与基于电感的拓扑或基于电容的拓扑相比,具有更高的均衡效率。基于变换器的均衡方法以电力电子变换器作为均衡器主体在电池间搬运能量,实现电池组平衡。文献[14]在双向变换器做均衡主体的基础上,采用额外电源进行供电,使用开关阵列实现均衡电流在电池之间的跳跃,模块化结构提高了系统的灵活性,但是对开关器件的控制较为复杂,且额外电源的使用增加了均衡器的成本。

通过对前述学者研究内容的总结与分析,本文主要针对传统均衡方法中存在均衡速度慢、均衡器体积大且成本高等缺点提出了一种开关阵列和隔离型双半桥变换器相结合的均衡方法。其中,开关阵列用于选通均衡通道,将需要平衡的电池单体与隔离型双半桥变换器相连接,实现电池单体与电池组之间的能量交换,以此达到电池组平衡的目的。该均衡方式不仅保证了均衡速度和效率,而且可以大大降低均衡电路的成本和体积。另外,隔离型双半桥变换器具有良好的电压电流输出特性^[16-17]能够满足梯次利用电池储能均衡系统的运行要求。与此同时,针对所提出的均衡拓扑结构,设计了对应的分状态均衡策略用于提高均衡电路的均衡效果。最后,在 MATLAB/Simulink 平台搭建了该均衡电路的仿真模型进行不同工作状态下的均衡仿真

实验,验证了所提均衡方法的可行性及有效性。

1 均衡拓扑与原理分析

1.1 均衡拓扑

本文提出了一种基于隔离型双半桥 DC-DC 变换器的串联退役电池组均衡拓扑结构,如图 1 所示。该拓扑结构主要由 5 部分构成:电池组模块、开关阵列模块、均衡主电路模块 MCU 主控模块以及用户端显示模块。

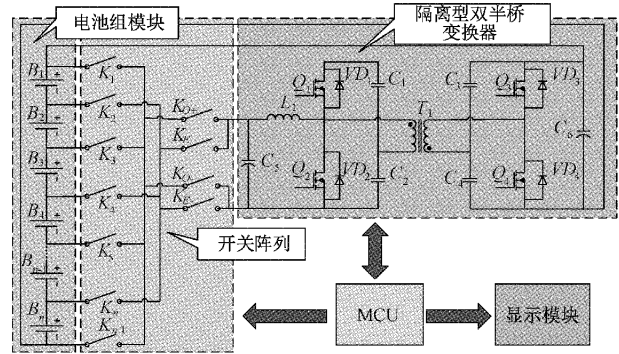


图 1 电池均衡拓扑结构

如图 1 所示,该拓扑包含 n 个单体电池组成的电池组, $n+5$ 个开关组成的开关阵列,以及一个隔离型双半桥 DC-DC 变换器。

开关阵列分为通道选择开关以及极性选择开关两种,如式(1)、(2)所示。

$$K_{chn} = \{K_1, K_2, \dots, K_n, K_{n+1}\} \quad (1)$$

$$K_{pol} = \{K_{O+}, K_{E+}, K_{O-}, K_{E-}\} \quad (2)$$

式中: K_{chn} 表示通道选择开关, K_{pol} 表示极性选择开关。

均衡主电路由隔离型双半桥 DC-DC 变换器构成,该变换器低压侧连接单体电池,高压侧连接整个电池组。通过该变换器的双向升降压功能,能够实现串联电池组与内部单体电池之间的能量交换。该电路一共有两种工作模式:升压模式和降压模式。当电路工作于升压模式时,均衡电路可以将某单体电池的能量转移至整个电池组模块;当电路工作于降压模式时,能量能够通过该均衡电路由整个电池组向某单体电池进行转移。通过两种工作模式的协同工作,最终能够实现整个电池组的平衡。

1.2 原理分析

图 2 为升压模式下,单体电池对电池组放电的工作原理图,该模式分为状态 1 和状态 2 两个部分。如图所示,当电路工作在状态 1 时,默认当前电路已达稳态,假设此刻电池 B_2 的 SOC(state of charge)最高,且电池组不一致性满足均衡电路工作条件,则开启均衡。闭合开关 K_2 、 K_3 、 K_{E+} 、 K_{O-} ,选通对应的开关通路。闭合 MOS 管 Q_2 ,电感 L_1 充能,均压电容 C_2 给变压器低压侧线圈提供“上负下正”的电压。变压器高压侧感生出一个“上正下负”的电压,二极管 VD_3 导通,变压器高压侧的感生电压给电容 C_3 充电,电容 C_3 和电容 C_4 串联对整个电池组放电。当电路工

作在状态 2 时,保持原开关通路不变。闭合 MOS 管 Q_1 ,电感 L_1 感生出一个“左负右正”的电压与电池 B_2 的电压叠加共同给电容 C_1 和 C_2 充电,均压电容 C_1 给变压器低压侧线圈提供“上正下负”的电压。变压器高压侧感生出一个“上负下正”的电压,二极管 VD_4 导通,变压器高压侧的感生电压给电容 C_3 充电,电容 C_3 和电容 C_4 串联对整个电池组放电。假设开关管 Q_1 导通占空比为 D_1 ,由输入电感 L_1 伏秒平衡可得式(3)。

$$\begin{cases} V_{c1} = \frac{1-D_1}{D_1}V_1 \\ V_{c2} = V_1 \\ V_{c3} = (1-D_1)V_2 \\ V_{c4} = D_1V_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $V_{c1}, V_{c2}, V_{c3}, V_{c4}$ 分别表示电容 C_1, C_2, C_3, C_4 两端电压, V_1 表示低压侧单体电池两端电压, V_2 表示高压侧整体电池组两端电压。

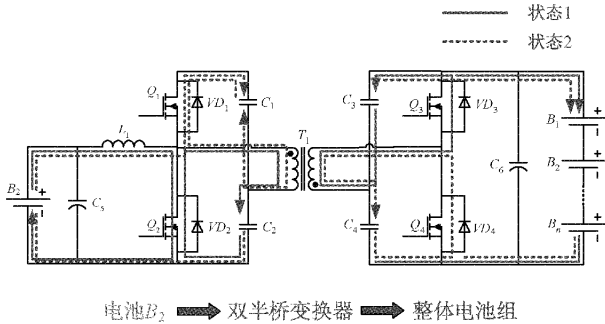


图 2 单体电池对电池组放电原理

变压器 T_1 匝比关系如式(4)所示。

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4)$$

式中: V_p 表示变压器原边电压, V_s 表示变压器副边电压, N_1 表示原边线圈匝数, N_2 表示副边线圈匝数。由式(3)、(4)可得工作在升压模式下,输入输出关系如式(5)所示。

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{D_1} \times \frac{N_2}{N_1} \quad (5)$$

图 3 为降压模式下,电池组对单体电池充电的工作原理图,该模式分为状态 3 和状态 4 两个部分。如图 3 所示,当电路工作在状态 3 时,假设此刻电池 B_3 的 SOC 最低。闭合开关 K_3, K_4, K_{O+}, K_{E-} ,选通对应的开关通路。闭合 MOS 管 Q_3 ,变压器高压侧线圈产生“上正下负”的电压。变压器低压侧感生出一个“上负下正”的电压,二极管 VD_2 导通,给电容 C_2 充电。电感 L_1 中的电流经二极管 VD_2 续流。当电路工作在状态 4 时,保持开关通路不变。闭合 MOS 管 Q_4 ,变压器高压侧线圈产生“上负下正”的电压。变压器低压侧感生出一个“上正下负”的电压,二极管 VD_1 导通,给电容 C_1 充电。同时通过电感 L_1 和电容 C_5 的滤波作用对外输出。通过上述两个状态的交替进行,实现电

池组对电池 B_3 充电。假设开关管 Q_3 导通占空比为 D_2 ,由输入电感 L_1 伏秒平衡可得式(6)。

$$\begin{cases} V_{c3} = D_2V_2 \\ V_{c4} = (1-D_2)V_2 \\ V_{c1} = \frac{D_2}{1-D_2}V_1 \\ V_{c2} = V_1 \end{cases} \quad (6)$$

由式(4)、(6)可得工作在降压模式下,输入输出关系如式(7)所示。

$$\frac{V_1}{V_2} = (1-D_2) \frac{N_1}{N_2} \quad (7)$$

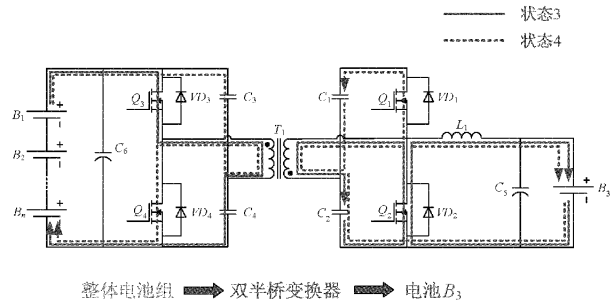


图 3 电池组对单体电池充电原理

该均衡电路的优点在于:

- 1) 变换器低压侧为 Boost 升压结构,高压侧为半桥降压结构,一定程度上能够减少变压器的变比;
- 2) 变换器为隔离型半桥结构,在保证均衡电路灵活控制的同时,具有较少的开关器件;
- 3) 变换器采用同步整流的工作模式,转换效率更高,减少了均衡过程中的能力损耗;
- 4) 分层式开关阵列的使用有效减少了开关阵列中开关的数量,降低了均衡电路的成本和体积。

2 控制策略

2.1 分状态均衡

由于退役电池的不一致现象更加明显,需要对其进行安全且合理的均衡,从而保证电池组的安全使用,提高退役电池组的可利用容量范围。本文针对电池组的不同状态采用不同的均衡方法,如图 4 所示。

- 1) 当电池组处于充电状态时,采用 SOC 最高的单体电池对电池组放电的均衡方法,保证电池组安全、健康使用的同时提高了电池组的充电容量;
- 2) 当电池组处于放电状态时,为了防止 SOC 最低的单体电池过放,采用电池组对 SOC 最低的单体电池进行充电均衡的方法,提高整个电池组的放电容量;
- 3) 当电池组处于静置状态时,采用 SOC 最高单体电池对电池组放电均衡方法,在实现电池组整体平衡的同时能够尽可能减少最弱单体电池的负担,进而提高电池组的使用寿命。

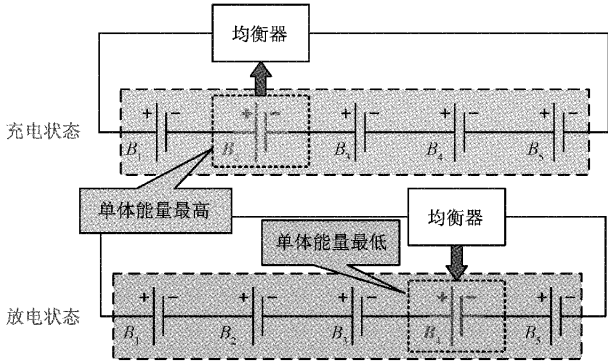


图 4 分状态均衡策略

2.2 均衡算法

采用退役电池 SOC 作为均衡变量,有利于提高均衡精度进而提高电池组的容量利用率。本文采用按时积分法对退役电池组进行 SOC 估算,如式(8)所示。

$$SOC = SOC_0 + \frac{1}{C_n} \int_0^t I dt \quad (8)$$

式中: SOC_0 为充放电起始状态, C_n 为电池额定容量, I 为电池电流, t 为放电结束时间。

以 n 节串联退役锂电池均衡为例。将 n 节电池标记为 $B_1, B_2, B_3, \dots, B_{n-1}, B_n$, 各单体电池的 SOC 分别记作 $SOC_1, SOC_2, SOC_3, \dots, SOC_n$ 。则平均电压 SOC_{av} 如式(9)所示。

$$SOC_{av} = \frac{SOC_1 + SOC_2 + SOC_3 + \dots + SOC_n}{n} \quad (9)$$

由此可得待均衡电池组集合 G 如式(10)所示。

$$G = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_n, y_n)\} \quad (10)$$

式中: x 表示各单体电池的 SOC 值, y 表示该电池的对应电池标号, G 表示电池组集合。

将电池组集合 G 进行降序排列,可以得到当前电池组中的最大 SOC 值 SOC_{max} 以及其对应的电池标号 Y_{max} 。同理,将电池组集合 G 进行升序排列,可以得到 SOC_{min} 以及 Y_{min} 。均衡流程如图 5 所示。

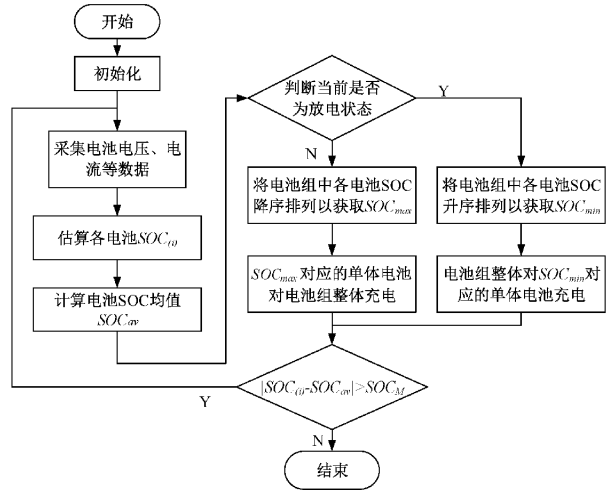


图 5 均衡算法流程

3 仿真分析

为验证本文所设计的均衡电路及均衡策略的有效性,本文在 MATLAB/Simulink 下构建了该电路的仿真模型,如图 6 所示。该模型包含电池组模块、开关阵列模块、隔离型双半桥变换器模块以及控制与显示模块。仿真实验参数具体如表 1 所示。以 18650 型号的电池为例,单体标称电压 3.7 V 相对较低,在梯次利用过程中往往需要以串联形式连接用以抬高电池组端电压。为便于仿真实验,选取了 5 节标称电压为 3.7 V、额定容量为 1.8 Ah 的锂离子电池串联连接作为仿真实验对象。

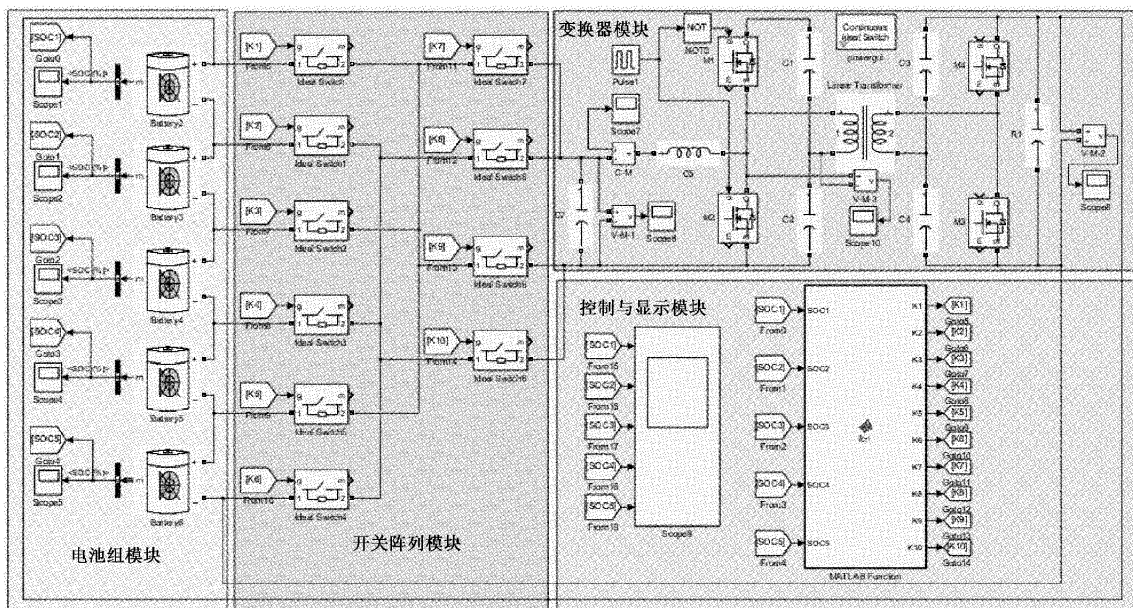


图 6 均衡仿真模型

表 1 仿真实验参数

参数	值
电池标称电压/V	3.7
电池内阻/m Ω	8
电池额定容量/Ah	1.8
占空比/%	50
开关频率/kHz	10
恒流源/A	1.8
变压器匝比/1:N	1:2.8
MOSFET 导通电阻/ Ω	0.1

该模型电池组模块选用 Simulink 自带的锂离子电池模型,电池组的充放电由可调节恒流源提供。控制模块的用于采集并比较电池组中各个单体电池的荷电状态 SOC,然后根据当前电路工作状态选通对应的开关通道,启动均衡过程。

3.1 电池组静置状态仿真与分析

当电池组处于静置状态时,对电池组进行均衡,此时能量只在电池组内部进行交换。将电池初始 SOC 分别设为:76%,73%,71%,68%,66%,均衡 SOC 变化曲线如图 7 所示。

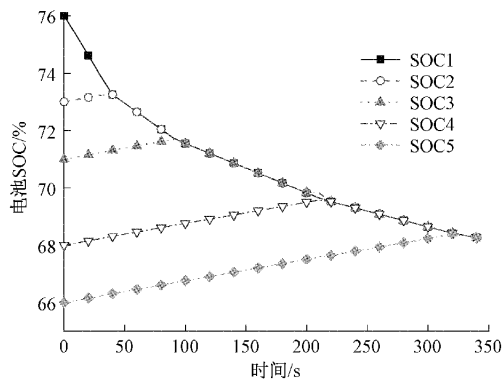


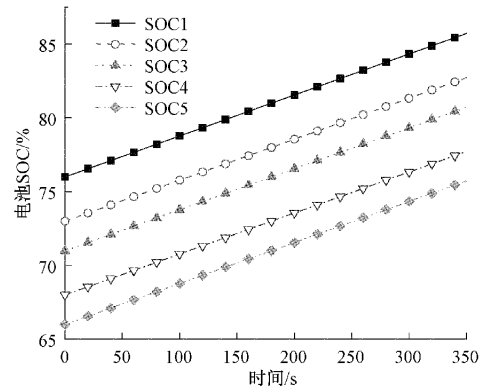
图 7 静置状态 SOC 变化曲线

电池组中最大 SOC 差值设定为 10%,较大的 SOC 差值可以清晰地看出均衡模块的效果。由图 7 所示的结果可以看出电池组在 320 s 附近基本达到均衡,最终 SOC 保持在 68.4% 左右。通过双半桥变换器将能量高的电池对整体进行充电,电池组整体较快实现了均衡效果,相比于不使用均衡器的电池组,其可用容量提高了 12%。以此可以证明该均衡电路及均衡策略在使电池组快速达到均衡状态的同时提高了电池组的可用容量。

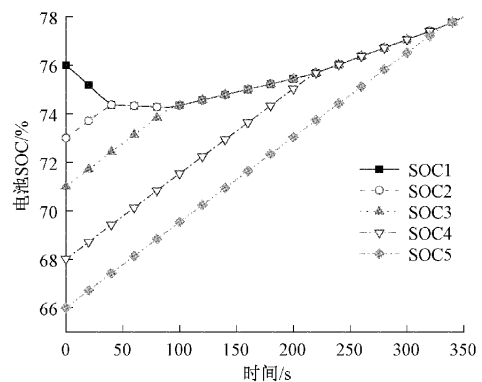
3.2 电池组充电状态仿真与分析

当电池组处于充电状态时,电池初始 SOC 设置与电池组静置状态相同,分别为:76%,73%,71%,68%,66%,以 1.8 A 恒定电流给电池组充电,均衡 SOC 曲线变化曲线如图 8 所示。图 8(a)为无均衡模块作用的情况,图 8(b)为有均衡模块作用的情况。

在充电实验中,如图 8(b)所示,电池组在 340 s 附近达到均衡效果,最终 SOC 保持在 77.78% 左右。在整个电池



(a) 无均衡作用



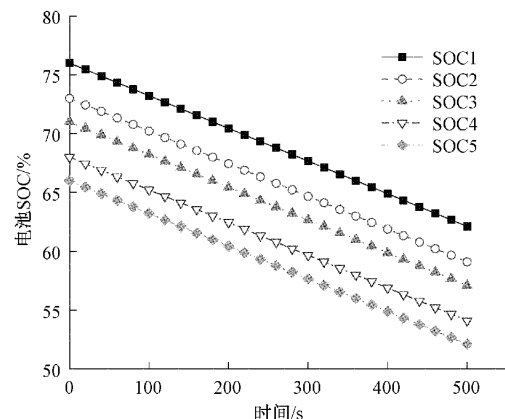
(b) 有均衡作用

图 8 充电状态 SOC 变化曲线

组中 SOC 较低的电池充电上升曲线较为明显。SOC 较高的电池充电的同时也会给电池组整体放电,因此上升曲线较为缓和甚至在充电初期还会呈现下降趋势。如图 8(a) 所示,无均衡作用的情况下,电池间 SOC 最大差值始终保持在 10%。仿真结果表明,该均衡方法有效提高了均衡效果且提高了约 9.9% 的能量利用率。

3.3 电池组放电状态仿真与分析

当电池组处于放电状态时,设置相同的起始条件,以 1.8 A 恒定电流对电池组进行放电均衡,其均衡 SOC 曲线变化曲线如图 9 所示。无均衡模块作用情况如图 9(a) 所示,有均衡模块作用情况如图 9(b) 所示。



(a) 无均衡作用

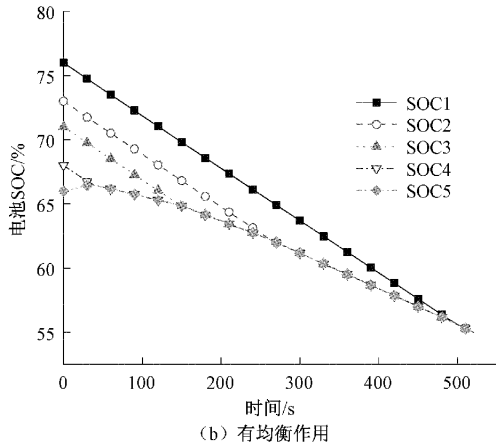


图 9 放电状态 SOC 变化曲线

图 9(b)仿真实验结果表明,电池组在 500 s 附近达到理想均衡效果,最终 SOC 保持在 55.6% 左右。由图 9(b)可以看出 SOC 较低的电池下降相对较为缓慢,当两个电池的 SOC 趋于一致时,会以相同的速率进行放电,这也避免了图 9(a)中 SOC 较低的电池较快达到放电极值出现过放情况。相比于图 9(a)可以算出,有均衡作用情况下可用容量提高了 17.5%。因此该均衡方法能有效提高电池容量的不一致性还可以较好的保证电池的安全性。

4 与传统均衡方法的比较

为证明本文所提出的退役电池均衡方法的优越性,现将各类均衡系统从元器件数量,电路成本,均衡系统体积,均衡效率,均衡速度等方面进行比较,如表 2 所示。

表 2 所提方法与传统方法的比较

类别	开关电容型 ^[8]	开关电感型 ^[9]	LC 谐振型 ^[19]	多绕组变压器型 ^[18]	所提方法
开关	2N	N	2N	N+1	N+5
二极管	0	0	3	0	0
电感	0	N	1	0	0
电容	N-1	0	1	0	0
变压器	0	0	0	1	1
成本	低	中等	中等	较高	较低
体积	小	小	较小	较大	较小
均衡效率	较低	中等	较高	中等	较高
均衡速度	静态约 350 s (2 节电池)	静态约 1 200 s (8 节电池)	静态约 400 s (3 节电池)	静态约 120 s (4 节电池)	静态约 320 s (5 节电池)

(其中, N 为电池数量)

如表 2 所示,文献[8]中提出的以电容为储能元件的均衡拓扑虽然结构简单,但均衡效率较低。文献[9]中提出的基于电感的均衡拓扑虽然均衡器体积小,但均衡效率一般,且存在电感数目过多,均衡系统不稳定的问题。文献[19]中提出了较高转换效率的 LC 谐振式的均衡结构,电路损耗相对较低,但该 LC 谐振电路对控制精度的要求较高。另外,采用多绕组变换器的均衡拓扑也有较多研究,如文献[18]中提出的双向反激式拓扑,虽然电路拓扑简单,但是每一个电池都需要连接一个变压器绕组,造成系统体积庞大,系统成本过高。

本文所提出的均衡拓扑通过开关阵列选择均衡通道进行能量转移,实现电池组均衡。相较于多绕组变压器式均衡拓扑通过增加绕组的方式实现电池均衡,本文所提出的均衡结构具有体积更小、成本更低的优点。另外,本文所提的均衡拓扑采用隔离型双半桥变换器作为均衡主体单元,均衡电流相比电容与电感型均衡结构更大,均衡速度更快。综上所述,本文提出的退役电池组的均衡方法在均衡速度和成本上有较高的优势,可以很好的满足退役电池均衡系统的要求。

5 结 论

本文针对串联梯次电池组中出现的能量不平衡问题,提出了一种基于隔离型双半桥 DC-DC 变换器的退役电池组有源快速均衡方法,实现了各电池单体电量均衡的目标。在分析均衡结构的基础上,以电池 SOC 作为均衡判据,考虑电池组在静置、充电、放电 3 种工作状态下的不同特性,设计了一种分状态均衡策略。最后在 Matlab/Simulink 平台针对 5 节串联锂离子电池进行了仿真实验,实验结果表明,相比于均衡操作前的电池组,静置状态下可用容量提高了 12%,充电状态下可用容量提高了 9.9%,放电状态下可用容量提高了 17.5%,证实了所提方法能够有效改善电池组的能量不平衡现象,提高电池组可用容量。

参考文献

[1] 李建林,李雅欣,吕超,等. 碳中和目标下退役电池筛选聚类关键技术研究[J/OL]. 电网技术, 2022, 46(2): 429-441.
 [2] 杨扬,谢长君,朱文超. 退役锂电池梯次利用主动均衡方法研究[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(6): 50-56.

- [3] 工业和信息化部 科技部 生态环境部 商务部 市场监管总局关于印发《新能源汽车动力蓄电池梯次利用管理办法》的通知[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(33):89-91.
- [4] 张博,刘皓明,张金波. 基于 DC/DC 变换器的储能电站锂电池快速均衡策略[J]. 电子测量技术, 2019, 42(20):1-5, DOI:10.19651/j.cnki.emt.1902969.
- [5] 赵光金,唐国鹏. 主被动均衡技术及其在电池梯次利用中的应用[J]. 电源技术, 2018, 42(7):983-986.
- [6] 郭向伟,刘震,耿佳豪,等. 基于 LC 储能的串联电池组主动均衡方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9):242-251, DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2006587.
- [7] KIM M Y, KIM C H, KIM J H, et al. A chain structure of switched capacitor for improved cell balancing speed of Lithium-Ion batteries [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8):3989-3999.
- [8] YE Y. Zero-current switching switched-capacitor zero-voltage-gap automatic equalization system for series battery string [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(7):3234-3242.
- [9] MA Y, DUAN P, SUN Y, et al. Equalization of Lithium-Ion battery pack based on fuzzy logic control in electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018:1-1.
- [10] 刘征宇,孙庆,马亚东,等. 基于 Buck-Boost 电路的能量转移型均衡方案[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(9):73-79, DOI:10.15938/j.emc.2017.09.010.
- [11] 巫春玲,程琰清,刘智轩,等. 一种改进的储能锂电池主动均衡拓扑研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(3):32-37, DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005555.
- [12] 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, DOI:10.19652/j.cnki.femt.2102932.
- [13] MOGHADDAM A F, BOSSCHE A V D. A single transformer for active cell equalization method of Lithium-Ion batteries with two times fewer secondaries than cells[J]. Electronics, 2019, 8(9):951.
- [14] 廖力,纪锋,吴铁洲,等. 采用附加电源的均衡电路与容量自均衡方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7):48-53.
- [15] GALLARDO L J, ROMERO C E, MILANES M M I, et al. Battery equalization active methods[J]. Journal of Power Sources, 2014, 246:934-949.
- [16] 余畅,蔡涛,魏芃,等. 动力电池分散逻辑式均衡系统及其均衡策略研究[J]. 电源学报, 2019, 17(2):10, DOI:10.13234/j.issn.2095-2805.2019.2.153.
- [17] 魏芃,蔡涛,朝泽云,等. 电池均衡系统的分布式协同一致性控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.192064.
- [18] 武笛. 基于双向反激直流变换器的锂离子电池均衡系统仿真研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.
- [19] YU Y, SAASAA R, EBERLE W. A series resonant circuit for voltage equalization of series connected energy storage devices[C]. 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), IEEE, 2016.

作者简介

詹敏, 硕士研究生, 主要研究方向为电池组均衡技术。

E-mail:102010285@hbt.edu.cn

柯锦洋, 硕士研究生, 主要研究方向为电池组均衡技术。

E-mail:101900167@hbut.edu.cn

吴铁洲, 工学博士, 教授, 研究方向为储能关键技术、光伏发电技术等。

E-mail:wzt315@163.com