

基于双向 DC-DC 变换器的串联电池组主动均衡电路

胡治国^{1*}, 司少康¹, 朱富超²

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南省 焦作市 454000;

2. 中国能源建设集团华南电力试验研究院, 广东省 广州市 510700)

Active Equalization Circuit of Series Battery Pack Based on Bidirectional DC-DC Converter

HU Zhiguo^{1*}, SI Shaokang¹, ZHU Fuchao²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan Province, China;

2. China Energy Construction Group South China Electric Power Test and Research Institute, Guangzhou 510700, Guangdong Province, China)

Abstract: Aiming at the inconsistency of single battery in series, an active equalization circuit of series battery pack based on bidirectional DC-DC converter is proposed. The DC-DC converter reduces the energy loss in the single battery and improves the storage efficiency without using the DC-DC converter. According to the approximate piecewise linear relationship between battery open circuit voltage (OCV) and state of charge (SOC), using voltage and SOC bivariate is used as the equalization strategy to correct the voltage equalization and real time SOC equilibrium to make the energy dynamics between battery packs tend to be consistent. Finally, the effectiveness of the proposed equalization circuit and equalization control strategy is verified by building an equalization circuit experimental platform composed of four single batteries.

Keywords: bidirectional DC-DC converter; open circuit voltage-state of charge (OCV-SOC); uniformity; equilibrium strategy

摘要: 针对单体电池串联成组使用时出现不一致性的问题, 提出了一种基于双向DC-DC变换器的串联电池组主动均衡电路。使用双向DC-DC变换器将单体电池中的高能量输送到能量低的单体电池中, 无需额外的存储组件来存储和传送能量, 减少了能量损失, 提高了均衡效率。根据电池开路电压 (open circuit voltage, OCV) 与荷电状态 (state of charge, SOC) 之间近似分段线性的关系, 采用以电压和SOC双变量作为均衡策略, 通过相互实时修正电压均衡和SOC均衡, 使得电池组间能量动态趋于一致。最后通过搭建由4节单体电池组成的均衡电路实验平台, 对提出的均衡电路和均衡控制策略进行有效性验证。

关键词: 双向DC-DC变换器; 开路电压-荷电状态 (OCV-SOC); 一致性; 均衡策略

0 引言

近年来, 动力电池作为电动汽车核心环节越来越受到广泛关注^[1-10]。不同单体电池的制作成分配比、老化和自放电等因素会导致电池组存在不一致性^[11-17], 这种不一致性会随着电池使用次数的增加进一步扩大, 从而降低电池组的容量和寿命^[18-24]。为了最大限度地提高电池组容量, 延长其使用寿命, 研究性能更加出众的电池均衡电路对改善电池组不一致性至关重要。

目前, 国内外专家学者提出了多种电池均衡电路, 例如文献[25-26]提出了基于变压器的均衡电路, 该均衡电路虽然提高了均衡效率, 但需要变压器数量多, 增加了元器件与控制信号, 使得系统体积庞大, 成本较高。文献[27-28]提出了以电容作为储能元件的均衡电路, 电池间压差大时均衡效果好, 压差小时则均衡效果不理想。文献[29-30]提出了基于单开关升降压电路的LC储能串联电池组均衡电路, 虽然使用的开关管数量少, 但每节电池都要配1个LC储能器件, 不利于缩小均衡系统体积, 且当单体电压相差不大时容易失控。

良好的均衡效果是均衡电路的基本要求, 而电路经济性、可集成性、尺寸以及控制和实现难度则关系到均衡电路的落地应用和推广。传统的变换器均衡电路普遍结构复杂、成本高, 且每个电池需配1个变压器绕组和1个开关管, 造成电路体积庞大、效率

基金项目: 河南省科技攻关项目 (202102210093)。

Science and Technology Research Project of Henan Province (202102210093).

低。为解决电路体积大、成本高、效率低的问题, 本文提出了基于双向DC-DC变换器串联电池组主动均衡电路, 该均衡电路由双向串联的MOSFET开关网络、抑制电路RLD和双向DC-DC变换器组成。双向串联MOSFET管可以提供双向路径来传输能量, 从而避免在均衡过程中有其他电流流过造成电池短路。抑制电路RLD减小开关管在均衡过程中的电流突变, 消除电流尖峰对单体电池的影响。双向变换器可将能量从荷电状态 (state of charge, SOC) 高的电池输送到低的电池中, 无需通过额外的存储组件来存储和传送能量, 减少了能量损失, 提高了均衡效率。

1 均衡拓扑结构及工作原理

1.1 均衡拓扑结构及特点

本文提出的均衡电路结构如图1所示, 主要包含3大模块: 串联电池组模块、双向串联的MOS开关网络模块和双向DC-DC变换器模块。串联电池组模块由 n 节单体电池组成。

与传统均衡电路相比, 文章提出的均衡电路适用于电动汽车串联电池组, 并可适配电池组不同状态工作, 主要有以下优点:

- 1) 均衡过程只需1台双向变换器即可完成能量传递, 电路结构简单、便于扩展;
- 2) 具有双向能量流动和良好的电隔离特性;

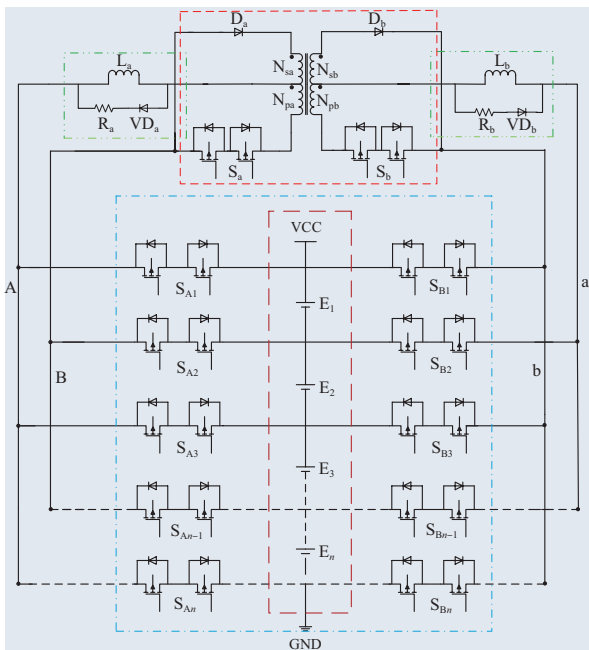


图 1 均衡电路原理图

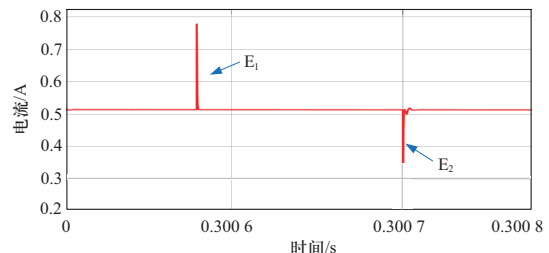
Fig. 1 Schematic diagram of equalization circuit

3) 在开关网络中加入抑制电路RLD减小开关管在均衡过程中的电流突变, 消除电流尖峰对单体电池的影响。

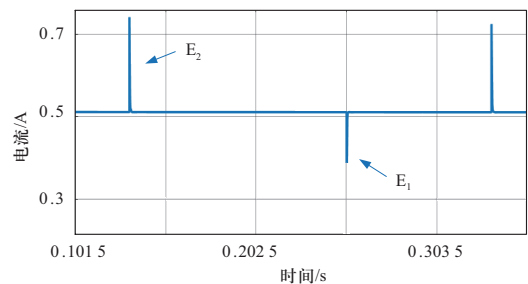
1.2 均衡电路工作原理

本文提出的均衡电路工作方式分为2种: 一种是奇数电池到偶数电池的均衡, 另一种是偶数电池到奇数电池的均衡。

如图2 (a) 所示, 当奇数电池 E_1 的电流高于偶数电池 E_2 时, MOS开关管 S_{A1} 、 S_{A2} 、 S_a 导通, 奇数电池 E_1 的能量通过导线A与B将电流传输至双向变换器 N_{pa} 中 (如图3左侧红线所示), 一次侧绕组 N_{pa} 的电流转移到二次侧绕组 N_{sb} ; 此时MOS开关管 S_{B2} 、 S_{B3} 和二极管 D_b 导通, 电流通过二极管 D_b 与开关管 S_{B2} 、 S_{B3} 传输至低偶数电池 E_2 中 (如图3右侧蓝线所示)。如图2 (b) 所示, 当偶数电池 E_2 的能量高于奇数电池 E_1 时, MOS开关管 S_{B2} 、 S_{B3} 、 S_b 导通, 偶数电池 E_2 的能量通过导线a与b将电流传输至双向变换器 N_{pb} 中 (如图3右侧红线所示)。在耦合作用下, 一次侧绕组 N_{pb} 的电流转移到二次侧绕组 N_{sa} ; 此时MOS开关管 S_{A1} 、 S_{A2} 和二极管 D_a 导通, 电流通过二极管 D_a 与开关管 S_{A1} 、 S_{A2} 传输至低能量奇数电池 E_1 中 (如图3左侧蓝线所示)。图4是1个周期内有无抑制电路RLD的情况下开关管的电流波形, 其中图4 (a) 是加抑制电路RLD的开关管电流, 图4 (b)



(a) 奇数电池 E_1 电流高于偶数电池 E_2 的电流波形



(b) 偶数电池 E_2 电流高于奇数电池 E_1 的电流波形

图 2 均衡电路中奇偶数电池电流不一致的电流变化波形
Fig. 2 Current variation waveform with inconsistent odd and even battery current in equalization circuit

是未加抑制电路RLD的开关管电流,二者对比可知,加上抑制电路的开关管关断电流从最大值下降到最小值时所用时间相对于未加抑制电路的所用时间较短,且电流下降光滑未有电流突变,提高了均衡效率。

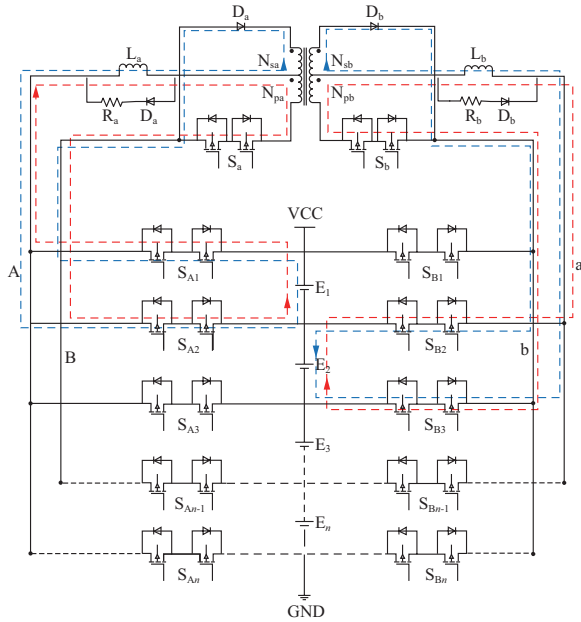
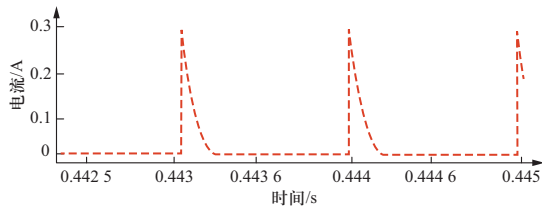
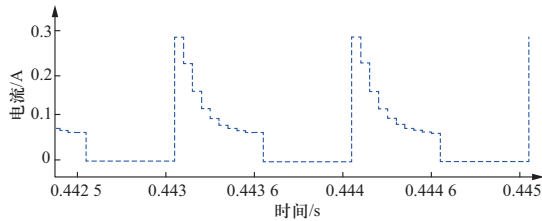


图3 均衡拓扑工作过程

Fig. 3 Work process of balanced topology



(a) 加抑制电路的开关管电流



(b) 未加抑制电路的开关管电流

图4 1个周期内开关管电流变化波形

Fig. 4 Current waveform of single cell in one cycle

2 均衡参数计算

要使均衡电路正常工作,需要计算元器件参数。

$$\begin{cases} \frac{R_a}{L_a} + L_a \frac{dI_a}{dt} + L_m \frac{dI_{Lm}}{dt} = V_a \\ I_a = I_{Lm} + I_o \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_m 是变换器绕组的等效励磁电感。

$$V_p = \frac{N_s}{N_p} \times V_s \quad (2)$$

式中: V_p 为副边电压; N_p 为副边匝数; V_s 为原边电压; N_s 为原边匝数。

开关管导通时,二极管 D_a 的正向导通电压 V_D 需满足:

$$\left(V_s \times \frac{N_s}{N_p} + V_s \right) > V_D \quad (3)$$

二次侧电压反射到一次电压 V_f 和一次侧MOS管所能承受的压降 V_{MOS} 为

$$\begin{cases} V_f = N(V_n + 2V_D) \\ V_{MOS} = V_i + V_f \end{cases} \quad (4)$$

式中: N 为变换器匝数比; V_n 为串联电池组总电压; V_D 为二极管导通压降; V_i 为均衡对象电压。

由上式可知,变换器的匝数比决定着MOS管的压降。为了降低一次侧MOS管的电压,匝数比的选择不可过大。

选好匝数比后,一次侧、二次侧电感的最大均衡电流为

$$I_p = \frac{DT(V_i - 3V_D)}{L_p} \quad (5)$$

式中: D 为一次侧电感电流上升时间占空比; T 为1个均衡周期; L_p 为在开关频率选好时一次侧电感; L_n 为二次侧电感。

$$\begin{cases} L_p = \frac{D(V_i - 3V_D)}{I_p f} \\ L_s = \frac{L_p}{N^2} \end{cases} \quad (6)$$

在1个均衡周期内,一次侧电感电流为

$$i_p = \frac{V_i - 3V_D}{L_p} t \quad 0 \leq t < DT \quad (7)$$

在1个均衡周期内,二次侧电感电流为

$$i_s = \begin{cases} N \frac{V_i - 3V_D}{L_p} DT - N^2 \frac{V_n}{L_p} (t - DT), & (D + D')T \leq t < T \\ 0, & DT \leq t < (D + D')T \end{cases} \quad (8)$$

据伏秒平衡原理:

$$(V_i - 3V_D)DT = \frac{1}{N} (V_n + 2V_D)D'T \quad (9)$$

即得:

$$D' = \frac{ND(V_i - 3V_D)}{V_n + 2V_D} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \frac{R_a}{L_a} + L_a \frac{dI_a}{dt} + L_m \frac{dI_{Lm}}{dt} = V_a \\ I_a = I_{Lm} + I_o \end{cases} \quad (11)$$

式中: L_m 是变换器绕组的等效励磁电感。

均衡效率也是均衡电路中重要参数, 在1个均衡周期 T 内, 能量高的电池 B_i 释放的能量 W_p 是一次侧电感中存储的能量和一次侧均衡过程中消耗的能量之和, 即

$$W_p = \int_0^{DT} \left(i_p L_p \frac{di_p}{dt} + 3V_D i_p + 3R_{DS} i_p^2 \right) dt \quad (12)$$

输送到变换器二次侧的能量 W_N 为

$$W_N = \int_0^{DT} i_p L_p \frac{di_p}{dt} dt - \int_{DT}^{(D+D)T} (2V_D i_N + R_{DS} i_N^2) dt \quad (13)$$

3 均衡控制策略

3.1 均衡变量的选择

因为电池组的单体电池OCV与电池的SOC近似成比例, 可以通过单体电池电压较准确地反映出电池荷电状态。所以, 本文采用开路电压法来获取SOC初始值。电池OCV-SOC的函数关系表达式通过MATLAB工具进行多项式拟合得到, 其6阶多项拟合表达式为

$$V_{ocv} = b_1 \times S_{OC}^6 + b_2 \times S_{OC}^5 + b_3 \times S_{OC}^4 + b_4 \times S_{OC}^3 + b_5 \times S_{OC}^2 + b_6 \times S_{OC} + b_7 \quad (14)$$

图5是采用6阶多项式拟合出来的结果, 得到了OCV与SOC之间的关系曲线。

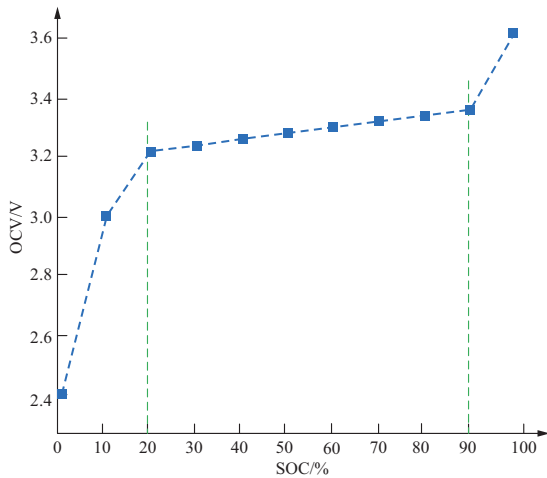


图5 OCV-SOC的多项式拟合曲线

Fig. 5 Polynomial fitting curve of OCV-SOC

由图5可知, 电池的SOC值在区间0%~20%与90%~100%时开路电压变化较大, 但在区间20%~90%时开路电压变化较慢。在SOC值较低即区间0%~20%时, 若以SOC作为均衡变量, 容易造成个别单体电池出现过放现象。在SOC值较高即区间90%~100%内, 以SOC作为均衡变量, 容易造成个别单体电池出现过

充现象。如SOC值在20%~90%区间内, 以电压作为均衡变量, 这时电压变化较小但SOC变化较大, 容易导致在电流变化的工况下出现均衡误操作。综上所述, 单体电池的能量处于任意状态且具有不确定性, 仅选1种均衡变量难以反映电池组的不一致性, 因此本文选择电压与SOC双变量作为均衡变量。

3.2 串联电池组均衡控制策略

均衡控制策略利用控制算法实时计算单体电池间的能量状态, 为均衡电路提供实时有效数据, 以产生准确的PWM信号, 控制均衡电路的实施。首先, 计算电池荷电状态的平均值 \bar{S}_{OC} 、电池电压平均值 \bar{V} 、设定 S_{OC} 差异启动阈值 $\alpha = 2\%$, 电压误差阈值 $\beta = 0.05 \text{ V}$, 然后根据检测系统检测到的单体电池的 S_{OC} 值计算串联电池组中总平均值 \bar{S}_{OC} 和电压平均值 \bar{V} 并给出计算公式:

$$\begin{cases} \bar{S}_{OC} = \frac{S_{OCE1} + S_{OCE2} + S_{OCE3} + \dots + S_{OCEn}}{n} \\ \bar{V} = \frac{V_{E1} + V_{E2} + V_{E3} + \dots + V_{En}}{n} \end{cases} \quad (15)$$

再把各个单体电池的 S_{OCEi} 值、 V_{Ei} 电压值与平均 \bar{S}_{OC} 、 \bar{V} 进行比较, 即

$$\begin{cases} |S_{OCEi} - \bar{S}_{OC}| \geq \alpha \\ |V_{Ei} - \bar{V}| \geq \beta \end{cases} \quad (16)$$

均衡电路中任一单体电池的能量满足式(16)时, 均衡电路开始工作。一旦电池均衡电路工作, 将选择奇数和偶数之间存在最大差值的2节电池进行均衡, 图6是均衡电路控制策略的流程图。

4 均衡仿真实验验证及分析

在Simulink中搭建由4节电池组成的仿真模型, 并在静置状态下进行有效性验证。其中, 串联电池组的标称电压设为3.7 V, 额定容量为20 Ah, 二极管导通压降设为0.6 V。4节电池组的初始 S_{OC} 分别为95%、90%、85%、80%, 本文MOSFET管采用N沟道金属氧化物场效应晶闸管, 相对于传统的P沟道在相同的状态下实现更低的漏源导通电阻 R_{DS} 和更低的电压降, 减小了能量损耗。如图7所示, 当奇数电池电压高于偶数电池电压时, 开关管对应的驱动信号为奇数信号, 当偶数电池电压高于奇数电池电压时, 开关管对应的驱动信号为偶数信号。

续表

参数名称	数值
占空比	45%
变换器匝数比 $N_{Pa} : N_{Pb} : N_{Sa} : N_{Sb}$	1 : 1 : 1.2 : 1.2
电阻/ Ω	1
电感 $L_a : L_b$	33
仿真时间/s	1200

为进一步验证均衡拓扑工作的有效性,对各个元器件工作过程进行波形仿真分析。

图8是均衡电路在工作时电池的功率变化波形,功率随着均衡电路中的能量变化逐渐减小,能量逐渐趋于一致,功率的变化量也逐渐减小。

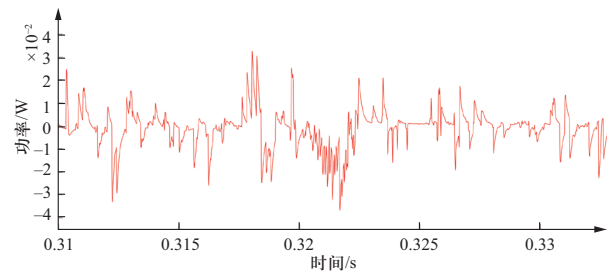


图8 均衡电路中的功率变化波形

Fig. 8 Power variation waveform in equalization circuit

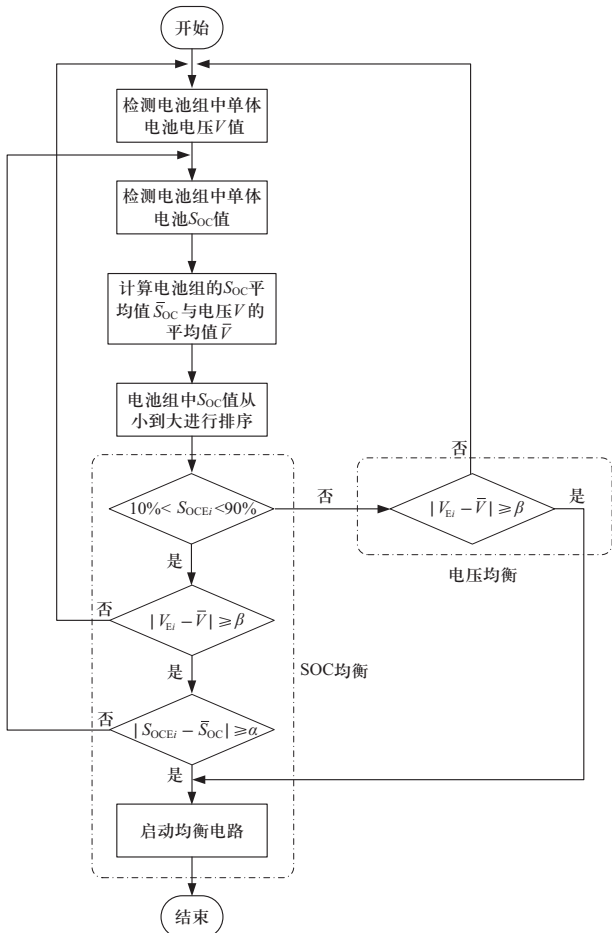


图6 控制策略流程图

Fig. 6 Control strategy flow chart

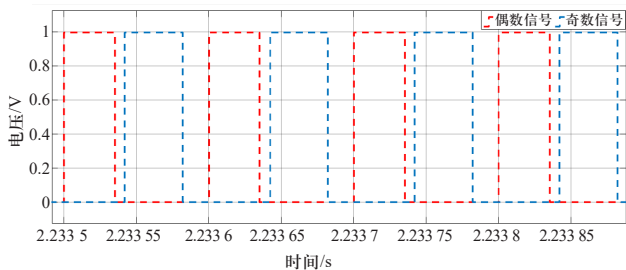


图7 控制信号波形

Fig. 7 Control signal waveform

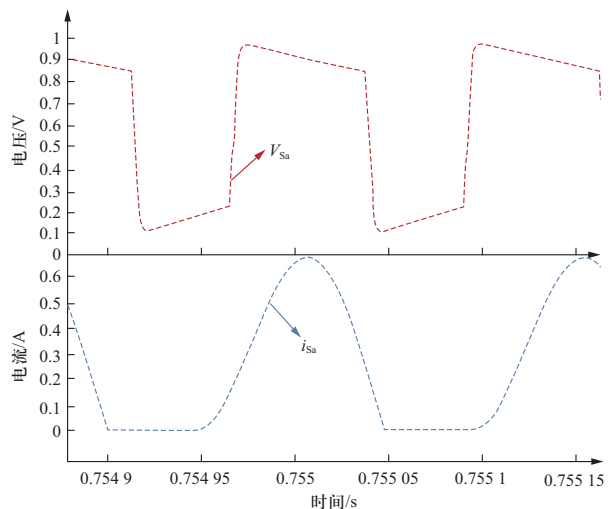
均衡拓扑仿真模型参数设置如表1所示。

表1 均衡实验参数

Table 1 Equilibrium experiment parameters

参数名称	数值
电池额定容量/Ah	3.2
额定电压/V	3.7
双向开关管M的频率/kHz	20
初始SOC值	95%、90%、85%、80%

如图9(a)所示,当双向开关管 S_{A1} 、 S_{A2} 、 S_{B1} 、 S_{B2} 和 S_a 导通时,电流 i_{Sa} 随着开关管 S_a 的导通逐渐上升至最大值,接着下降直到 S_a 关断电流减小为0,从而使开关在零电流条件下工作。图9(b)是双向变换器 N_{Pa}



(a) S_a 导通与关断时的能量变化波形

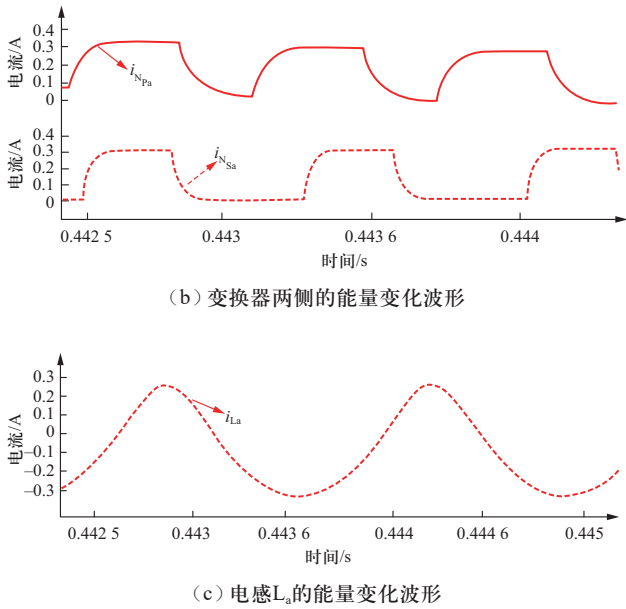
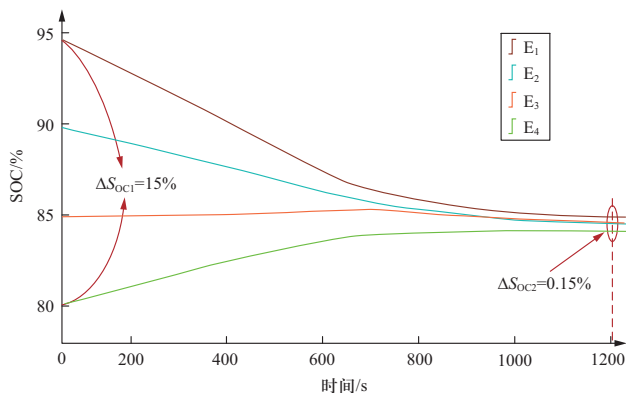


图 9 均衡电路各器件仿真波形

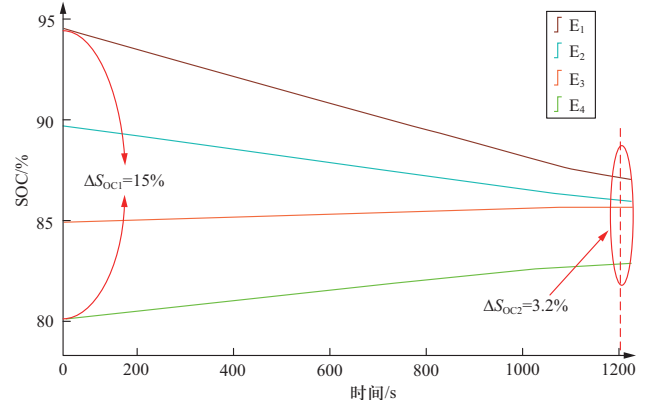
Fig. 9 Simulation waveforms of various devices in balanced circuit

一侧电流 $i_{N_{Pa}}$ 随开关管的导通逐渐增加, 在耦合作用下, 一次侧绕组 N_{Pa} 的能量可以转移到二次侧绕组 N_{Sb} 上, 因此, 二次侧绕组 N_{Sb} 的电流 $i_{N_{Sb}}$ 也增加。当 S_a 关断时, 二次侧绕组 N_{Sb} 的电流 $i_{N_{Sb}}$ 向低电压电池转移, 电流逐渐减小。图9 (c) 是缓冲电路RLD中电感 L_a 的电流 i_{L_a} 以正弦方式从0上升, 然后在每半个开关周期内变回0, 这对于降低开关损耗和电磁干扰、延长元器件的使用寿命有重要意义。

图10是电池的 S_{OC} 仿真波形, 其中图10 (a) 是本文提出的均衡拓扑电路的 S_{OC} 仿真波形, S_{OC} 值在1200 s时趋于一致, 其最大误差从原来的15%下降至0.15%。图10 (b) 采用电压差值的单阈值控制策略, 在相同的仿真条件下 S_{OC} 值在1200 s左右未趋于一致, 其最大误差值从15%减小至3.2%, 均衡效率低, 速度慢。



(a) 本文提出的均衡电路波形变化



(b) 单阈值控制策略的SOC仿真波形

图 10 静置状态下的电池均衡SOC波形

Fig. 10 Battery equalization SOC waveform under static state

5 硬件实验验证

为验证上述的仿真结果, 搭建如图11所示的均衡实验平台, 利用4节NCR18650B型三元锂电池组成均衡电路进行实验, 其电池标称电压为3.7 V, 额定容量为3.2 Ah, 最大均衡电流为0.6 A。

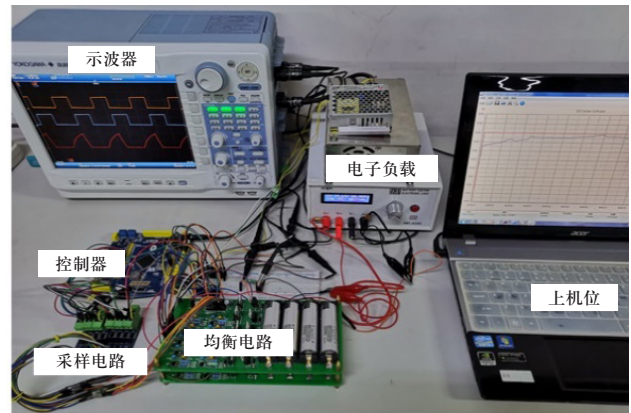


图 11 串联电池组均衡实验平台

Fig. 11 Series battery pack balancing experiment platform

图12为单体电池在静置状态下的相关器件波形变化, 其中图12 (a) 是控制信号的波形变化。图12 (b) 是加缓冲电路RLD时MOS管在1个开关周期内的波形, 当 S_a 导通时, 电流 i_{S_a} 随着开关管 S_a 的导通逐渐上升到最大值, 接着下降直到 S_a 关断电流减小为0, 从而使开关在0电流条件下工作。图12 (c) 是未加缓冲电路RLD时MOS管波形, MOS管在导通时, 其电流变化在上升过程中会有较小的浮动变化, 这是电池的极化效应导致MOS管导通时对电路造成的干扰; 对比图12 (b), 说明加上缓冲电路能够有效抑制这些干扰。

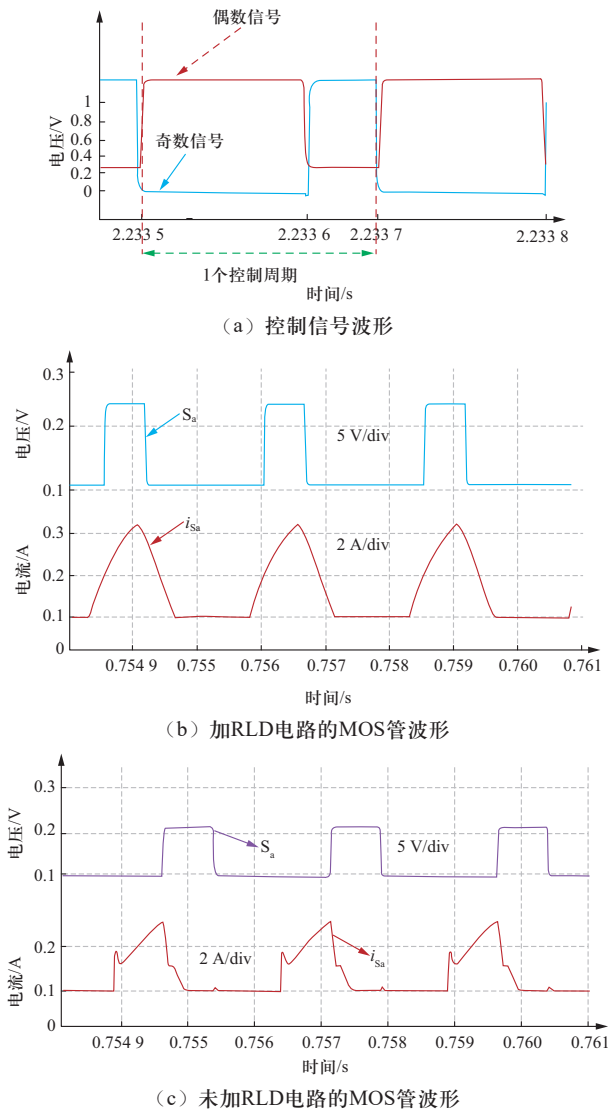


图 12 静置状态下相关波形

Fig. 12 Waveforms under static state

图13是4节单体串联电池组在1个控制信号周期内的电压变化波形。当 S_a 导通时，电压最高的单体电池 E_1 放电，其电压逐渐下降，其后电压又上升，这是锂电池的极化效应引起的。 S_a 关断时电压最小的单体电池 E_2 充电，由于锂电池的极化效应，单体电池 E_2 的电压会有先上升后逐渐下降的过程。

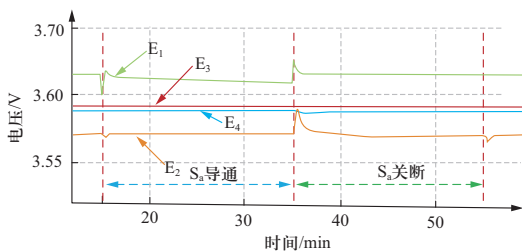
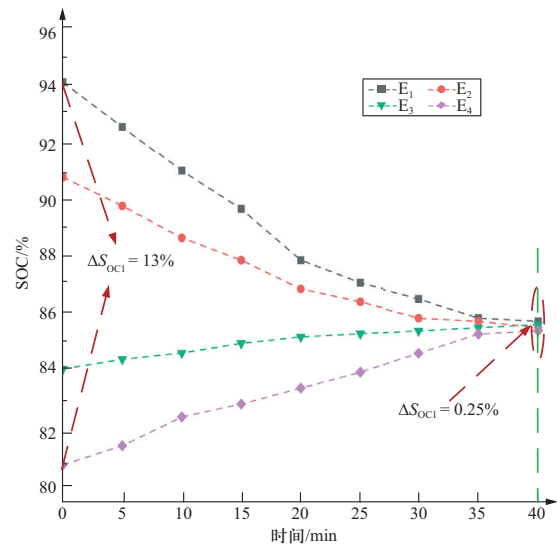


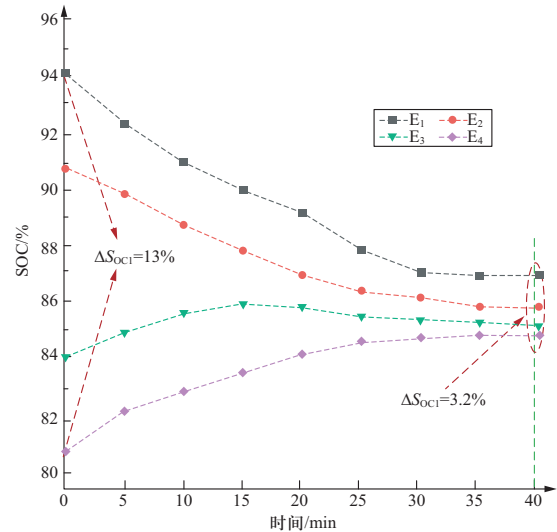
图 13 E_1 最高、 E_2 最低时电压变化波形

Fig. 13 E_1 highest, E_2 minimum voltage variation waveform

图14是静置状态下均衡实验的SOC波形。图14(a)是本文提出的均衡拓扑电路的SOC实验波形，由图可知SOC值在40 min时趋于一致，其最大误差从原来的13%下降至0.25%。图14(b)是采用单阈值电压差值的SOC实验波形，在相同的实验条件下，SOC值在40 min时，最大差值从13%减小至3.2%，大于设定的SOC差异启动阈值，此时均衡电路继续工作，相对于本文提出的双阈值均衡策略，单阈值策略均衡效率低，速度慢。



(a) 本文均衡电路实验波形



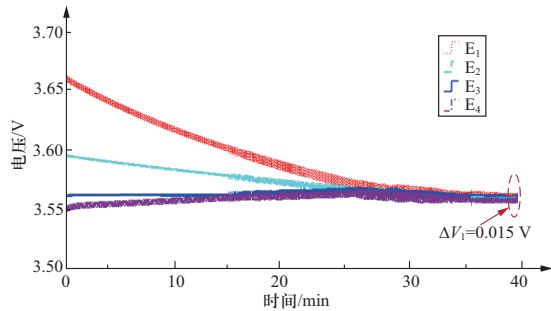
(b) 对比均衡电路实验波形

图 14 静置状态下的SOC实验波形

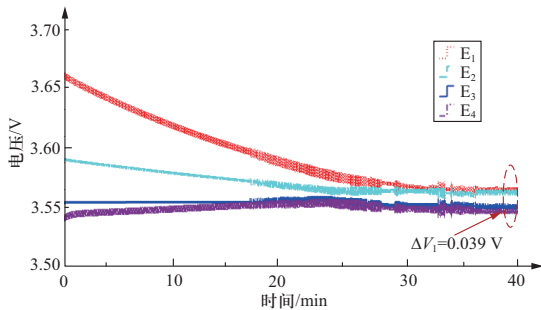
Fig. 14 SOC waveform under static state in experiment

图15是在相同条件下电池组的各单体电池电压变化波形。图15(a)是本文均衡电路的电压波形，均衡开始时，各单体电池电压最大差值为0.13 V，经过40 min后，电压最大差值缩小至0.015 V，达到设

定的电压差异启动阈值0.05 V范围内, 电池组电压趋于一致。图15 (b) 是采用单阈值的电池组电压波形, 在相同的均衡条件下, 电压在40 min时, 最大差值从0.13 V减小至0.039 V, 大于本文提出均衡电路的0.015 V, 因此相对于本文提出的双阈值均衡策略, 单阈值策略均衡误差较大且速度较慢。



(a) 本文均衡电路实验波形

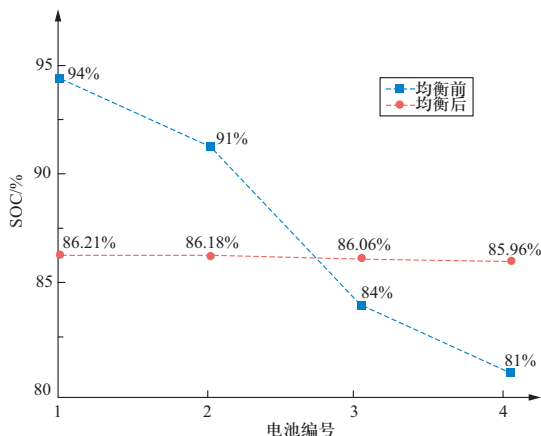


(b) 对比均衡电路实验波形

图 15 电压静置实验波形

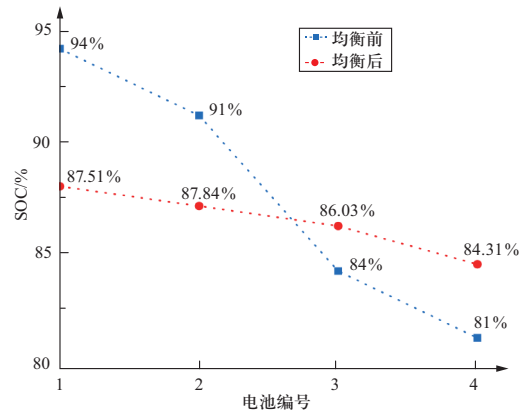
Fig. 15 Voltage waveform under static state in experiment

图16是实验过程中各单体SOC最大误差值的变化曲线。图16 (a) 是本文提出的均衡拓扑的SOC最大误差变化曲线, 开始时4节电池的最大SOC误差值为13%, 大于设定阈值2%, 启动均衡拓扑。大约40 min



(a) 本文SOC最大误差变化曲线

时各单体电池的SOC趋于一致, 误差从原来的13%减小至0.25%。图16 (b) 是采用电压差值的单阈值控制策略的SOC最大误差变化曲线, 在相同条件下启动均衡拓扑, 在40 min时各单体电池的SOC误差为3.2%。



(b) 对比均衡SOC最大误差变化曲线

图 16 SOC均衡效率波形

Fig. 16 SOC equalization efficiency waveform

对均衡速度和电池组最大差值进行对比后, 再根据效率公式对效率进行比较:

$$\eta = \frac{Q_{end}}{Q_{initial}} = \frac{\sum_{i=1}^n (SOC_i)_{end} \times Q_i}{\sum_{i=1}^n (SOC_i)_{initial} \times Q_i + nI_{ch}t} \quad (17)$$

由式 (17) 可知, 均衡后所有单体的总容量与均衡前所有单体的总容量和充电获得的总能量之比就是均衡效率, 据此计算可得本文提出的均衡电路和双阈值控制策略组成的均衡系统的效率为95.33%, 而采用单阈值和均衡电路组成的对比实验电路的均衡效率为92.23%。因此, 在相同条件下, 本文提出的均衡拓扑电路均衡速度较快且效率较高。

6 结论

为解决串联电池组中的不一致性问题, 本文提出了基于双向DC-DC变换器的串联电池组主动均衡电路。双向MOS管和缓冲电路RLD与双向对称变换器相连, 构成本文提出的均衡电路。以电压和SOC双变量作为均衡策略, 搭建由4节单体电池组成的均衡电路仿真实验平台和实物实验平台。在静置状态下, 本文提出的均衡系统电池组的SOC最大差值从13%减小至0.25%, 电压从0.13 V减小至0.015 V, 均衡效率为

95.33%。在相同的条件下,对比实验均衡系统电池组的SOC最大差值从13%减小至3.2%,电压从0.13 V减小至0.039 V,均衡效率为92.23%,实验结果验证了本文提出的均衡电路以及控制策略的均衡效果更好。

参考文献

- [1] 胡治国, 司少康. 新能源汽车电池管理方法综述[J]. 汽车文摘, 2021(4): 1-6.
HU Zhiguo, SI Shaokang. Research on battery management system of new energy vehicles[J]. Automotive Digest, 2021(4): 1-6 (in Chinese).
- [2] 刘春辉, 任宏斌. 基于SOC的动力电池组主动均衡研究[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 667-672.
LIU Chunhui, REN Hongbin. Research on active equalization of power batteries based on state of charge[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(2): 667-672 (in Chinese).
- [3] PRATAP SINGH S, PRAKASH SINGH P, NIWAS SINGH S, et al. State of charge and health estimation of batteries for electric vehicles applications: key issues and challenges[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(2): 145-157.
- [4] 肖迁, 穆云飞, 焦志鹏, 等. 基于改进LightGBM的电动汽车电池剩余使用寿命在线预测[J]. 电工技术学报, 2022, 37(17): 4517-4527.
XIAO Qian, MU Yunfei, JIAO Zhipeng, et al. Improved LightGBM based remaining useful life prediction of lithium-ion battery under driving conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(17): 4517-4527 (in Chinese).
- [5] 王芳, 林春景, 刘磊, 等. 动力电池安全性的测试与评价[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(6): 967-971.
WANG Fang, LIN Chunjing, LIU Lei, et al. Test and evaluation on safety of power batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(6): 967-971 (in Chinese).
- [6] 王震坡. 双碳目标下电动汽车有序充电与车网互动技术研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(5): 1.
WANG Zhenpo. Research on the interactive technology of electric vehicle ordered charging and vehicle network under the double carbon target[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5): 1 (in Chinese).
- [7] 王开让, 刘辉, 邹乃鹏, 等. 并联锂离子电池组建模及不平衡电流分析[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(2): 179-185.
WANG Kairang, LIU Hui, ZOU Naipeng, et al. Modeling and unbalanced current analysis of parallel lithium-ion battery packs[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(2): 179-185 (in Chinese).
- [8] CAI Y C, QI D L. A distributed VSG control method for a battery energy storage system with a cascaded H-bridge in a grid-connected mode[J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(4): 343-352.
- [9] 张谦, 邓小松, 岳焕展, 等. 计及电池寿命损耗的电动汽车参与能量-调频市场协同优化策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 72-81.
ZHANG Qian, DENG Xiaosong, YUE Huanzhan, et al. Coordinated optimization strategy of electric vehicle cluster participating in energy and frequency regulation markets considering battery lifetime degradation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 72-81 (in Chinese).
- [10] 张天培, 王成亮, 崔恒志, 等. 基于WNN与FCM的电动汽车动态充电负荷预测方法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 167-174.
ZHANG Tianpei, WANG Chengliang, CUI Hengzhi, et al. Dynamic charging load prediction method of electric vehicle based on wavelet neural network and FCM[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 167-174 (in Chinese).
- [11] 李雄, 李培强. 梯次利用动力电池规模化应用经济性及应用边界分析[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 717-725.
LI Xiong, LI Peiqiang. Analysis of economics and economic boundaries of large-scale application of power batteries in cascade utilization[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(2): 717-725 (in Chinese).
- [12] 胡建, 林春景, 郝维健, 等. 动力电池标准体系建设现状及建议[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(1): 313-320.
HU Jian, LIN Chunjing, HAO Weijian, et al. Current status and suggestions for the construction of power battery standard system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(1): 313-320 (in Chinese).
- [13] 王芳, 王峥, 林春景, 等. 新能源汽车动力电池安全失效潜在原因分析[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1411-1418.
WANG Fang, WANG Zheng, LIN Chunjing, et al. Analysis on potential causes of safety failure of new energy vehicles[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5): 1411-1418 (in Chinese).
- [14] 严康为, 龙鑫林, 鲁军勇, 等. 高倍率磷酸铁锂电池简化机理建模与放电特性分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 599-609.
YAN Kangwei, LONG Xinlin, LU Junyong, et al. Simplified mechanism modeling and discharge characteristic analysis of high C-rate LiFePO₄ battery[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 599-609 (in Chinese).
- [15] 武龙星, 庞辉, 晋佳敏, 等. 基于电化学模型的锂离子电池荷电状态估计方法综述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(7): 1703-1725.
WU Longxing, PANG Hui, JIN Jiamin, et al. A review of SOC estimation methods for lithium-ion batteries based on electrochemical model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1703-1725 (in Chinese).
- [16] 黄凯, 丁恒, 郭永芳, 等. 基于数据预处理和长短期记忆神经网络的锂离子电池寿命预测[J]. 电工技术学报, 2022,

- 37(15): 3753-3766.
HUANG Kai, DING Heng, GUO Yongfang, et al. Prediction of remaining useful life of lithium-ion battery based on adaptive data preprocessing and long short-term memory network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15): 3753-3766 (in Chinese).
- [17] 刘运鑫, 姚良忠, 周金辉, 等. 基于LSTM的锂电池储能装置SOC与SOH联合预测[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(1): 37-45.
LIU Yunxin, YAO Liangzhong, ZHOU Jinhui, et al. Joint prediction of state of charge and state of health based on LSTM for lithium-ion batteries[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(1): 37-45 (in Chinese).
- [18] 张朝龙, 赵筛筛, 章博. 基于因子分析与K-means聚类的退役动力电池快速分选方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 41-47.
ZHANG Chaolong, ZHAO Shaishai, ZHANG Bo. A fast classification method based on factor analysis and K-means clustering for retired electric vehicle batteries[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 41-47 (in Chinese).
- [19] 厉运杰, 张光雨, 祝维文, 等. 基于壅塞流的动力电池防爆阀泄压特性的动态仿真[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(3): 960-967.
LI Yunjie, ZHANG Guangyu, ZHU Weiwen, et al. The dynamic simulation of pressure relief characteristics of the power battery vent based on choking flow[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(3): 960-967 (in Chinese).
- [20] 李锐华, 李冀, 胡波, 等. 基于Buck-Boost变换器的磷酸铁锂电池串联电压均衡优化策略[J]. 电气技术, 2018, 19(3): 1-7.
LI Ruihua, LI Ji, HU Bo, et al. Voltage equalization optimization strategy for LiFePO₄ series-connected battery packs based on buck-boost converter[J]. Electrical Engineering, 2018, 19(3): 1-7 (in Chinese).
- [21] 李勇琦, 郑耀东, 董缙, 等. 退役锂离子动力电池储能系统风冷热管理仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 8-15.
LI Yongqi, ZHENG Yaodong, DONG Ti, et al. Wind cooling heat management simulation of a retired lithium ion battery energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 8-15 (in Chinese).
- [22] 李建林, 李雅欣, 黄碧斌, 等. 退役动力电池一致性评估及均衡策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 1-7.
LI Jianlin, LI Yaxin, HUANG Bibin, et al. Research on consistency evaluation and control strategy of a retired power battery[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 1-7 (in Chinese).
- [24] 张元星, 李斌, 颜湘武, 等. 基于电池模型的电动汽车充电故障监测与预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 143-154.
ZHANG Yuanxing, LI Bin, YAN Xiangwu, et al. Monitoring and early warning method of EV charging failure based on a battery model[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 143-154 (in Chinese).
- [24] LI N, ZHANG Y, HE F X, et al. Review of lithium-ion battery state of charge estimation[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 619-630.
- [25] 李玉, 徐俊, 彭程, 等. 结合变压器正反激原理的动力电池主动均衡方法[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(8): 151-158.
LI Yu, XU Jun, PENG Cheng, et al. An active equalization technology for power batteries based on forward-flyback principle of transformers[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(8): 151-158 (in Chinese).
- [26] 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.
ZHANG Bo, LIU Haoming, ZHANG Jinbo. A quick equalization strategy for lithium battery in energy storage power station based on DC/DC converter[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(20): 1-5 (in Chinese).
- [27] 赵汉宾, 马锋, 叶晓东, 等. 基于改进型飞渡电容的电池组动态均衡控制方法研究[J]. 电子学报, 2018, 46(4): 819-826.
ZHAO Hanbin, MA Feng, YE Xiaodong, et al. Battery dynamic balance control algorithm based on modified flying-capacitor[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(4): 819-826 (in Chinese).
- [28] FENG J, CHERNOVA N A, OMENYA F, et al. Effect of electrode charge balance on the energy storage performance of hybrid supercapacitor cells based on LiFePO₄ as Li-ion battery electrode and activated carbon[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2018, 22(4): 1063-1078.
- [29] UNO M, TANAKA K. Single-switch cell voltage equalizer using multistacked 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.
- [30] 徐顺刚, 文瑞强, 周国华, 等. 一种单电容集中式均衡电路[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(3): 1-10.
XU Shungang, WEN Ruiqiang, ZHOU Guohua, et al. Single-capacitor centralized battery equalizer[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(3): 1-10 (in Chinese).

收稿日期: 2022-01-26; 修回日期: 2022-04-01。

作者简介:



胡治国

胡治国 (1976), 男, 硕士研究生导师, 副教授, 研究方向为微电网储能等。通信作者, E-mail: 17839217215@163.com。

(责任编辑 张宇)