

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230536

# 基于自适应模糊 PID 算法的锂电池组双层均衡控制

吴文进<sup>1</sup>, 郭海婷<sup>1</sup>, 苏建徽<sup>2,3</sup>, 赖纪东<sup>2,3</sup>

(1. 安庆师范大学电子工程与智能制造学院, 安徽 安庆 246133; 2. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室), 安徽 合肥 230071)

**摘要:** 为提高电池重组时的均衡效率, 在传统 Buck-Boost 均衡拓扑电路的基础上, 设计了一种锂电池组双层均衡拓扑电路。组内采用 Buck-Boost 电路均衡, 组间利用双向反激变压器进行均衡。均衡控制策略采用自适应模糊 PID 算法, 以电池荷电状态(state of charge, SOC)为均衡变量, 利用模糊控制算法对 PID 参数进行调节, 缩短了均衡时间, 提高了均衡效率。在 Matlab/Simulink 中搭建了锂电池组双层均衡拓扑电路和自适应模糊 PID 控制算法模型。实验结果表明: 在不同工作状态下, 所提出的电池组均衡拓扑及其控制策略将均衡时间效率平均提高了 58.36%, 验证了该方案的有效性。

**关键词:** 锂电池; 双层均衡电路; 均衡控制; 自适应模糊 PID 算法; Buck-Boost 电路

## Dual-layer equalization control of lithium batteries based on an adaptive fuzzy PID algorithm

WU Wenjin<sup>1</sup>, GUO Haiting<sup>1</sup>, SU Jianhui<sup>2,3</sup>, LAI Jidong<sup>2,3</sup>

(1. School of Electronic Engineering and Intelligent Manufacturing, Anqing Normal University, Anqing 246133, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center (Anhui Energy Laboratory), Hefei 230071, China)

**Abstract:** In order to improve the equalization efficiency of battery recombination, a dual-layer equalization topology circuit of lithium battery pack is designed based on the traditional Buck-Boost equalization topology circuit. Buck-Boost circuit is used for equalization in the battery pack and bidirectional flyback transformer is used for equalization between the battery pack. The adaptive fuzzy PID algorithm is adopted in the equalization control strategy, and the battery SOC is taken as the equalization variable. The fuzzy control algorithm is used to adjust the PID parameters, which shortens the equalization time and improves the equalization efficiency. In Matlab/Simulink, a dual-layer equalization topology circuit and an adaptive fuzzy PID control algorithm model for lithium battery pack are built. The experimental results show that the battery pack equalization topology and its control strategy can improve the equalization time efficiency by an average of 58.36% under different working conditions, which verifies the effectiveness of the scheme.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. SQ2020YFF0402315).

**Key words:** lithium battery; dual-layer equalization circuit; equalization control; adaptive fuzzy PID algorithm; Buck-Boost circuit

## 0 引言

锂离子电池因其能量密度与功率密度较高、使用寿命长等优点被广泛应用于多个领域<sup>[1-4]</sup>, 但是大多数应用需要将单个电池串并联以获取更高的电压

和更大的容量<sup>[5]</sup>。由于单体电池间必然存在差异, 因此电池系统中常存在不平衡现象, 这对电池的使用寿命影响很大。因此对电池组进行均衡控制是必要的<sup>[6-9]</sup>。

电池均衡按均衡方式可以分为被动均衡和主动均衡<sup>[10]</sup>。被动均衡<sup>[11]</sup>通过在电池两端并联电阻和开关, 将大容量电池部分电量进行释放, 从而达到均衡的目的。主动均衡通过特定的能量元件对电池能量进行重新分配, 能量损耗较小。完成能量转移的

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助 (SQ2020YFF0402315); 安徽高校协同创新项目资助 (GXXT-2021-025); 储能技术学院质量工程项目资助 (2021cyxy045)

储能元件一般又分为电容、电感、变压器和变换器四大类<sup>[12-13]</sup>。

文献[14-15]以 DC/DC 变换器中的 Buck-Boost 电路为基本均衡结构,采用传统的差值-均值控制策略,实现电池组均衡。该均衡电路结构简单,容易控制,但是当串联电池数量增多时,均衡效率会明显下降。文献[16]以电感为储能元件,单体电池剩余容量作为均衡变量,该方法能够减少均衡过程中转移的电荷量,降低损耗。文献[17]将反激变压器作为储能元件,该均衡拓扑能够快速实现电池间能量转移,但是需要的功率开关较多,控制复杂。文献[18-19]对均衡策略做出改进,分别以电池荷电状态、电压平衡为均衡变量,以快速实现电池间均衡。这些方法在电池数量较少时能够快速实现均衡,但

是随着电池数量的增加,均衡效率会随之降低。

综上所述,针对现有均衡结构存在的问题,本文提出了一种锂电池组双层均衡电路拓扑。对传统 Buck-Boost 均衡电路<sup>[20]</sup>进行改进,以电池荷电状态 (state of charge, SOC)为均衡变量,采用自适应模糊 PID 控制方法,在电池的不同工作状态下,实现串联电池组的快速均衡。

## 1 电池组均衡拓扑结构及原理

### 1.1 电池组均衡结构

考虑串联电池组在应用时串联电池数量较多,为提高串联电池组均衡效率,本文结合 Buck-Boost 电路与双向反激变压器<sup>[21-22]</sup>,以 8 节串联电池为例,建立串联电池组双层均衡拓扑如图 1 所示。

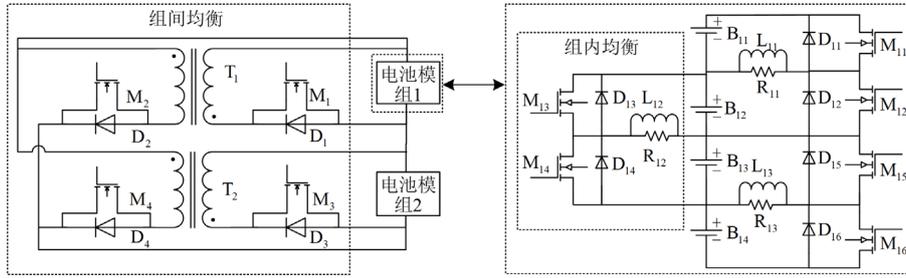


图 1 串联电池组双层均衡拓扑

Fig. 1 Dual-layer equalization topology of series battery pack

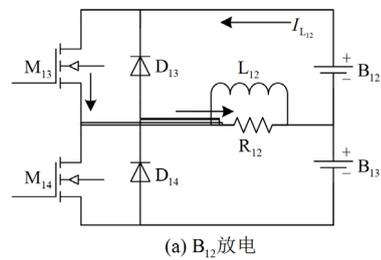
均衡拓扑包括两个电池模组和两个隔离型双向反激变压器。以 4 节串联电池为一个电池模组,模组内采用 Buck-Boost 电路进行能量传递。其中,  $M_{11} - M_{16}$  为组内开关管,  $D_{11} - D_{16}$  为续流二极管,  $L_{11} - L_{13}$  为储能电感,  $R_{11} - R_{13}$  为电阻。模组间使用隔离型双向反激变压器实现能量的双向传递,  $T_1$ 、 $T_2$  为变压器,  $M_1 - M_4$  为组间开关管,  $D_1 - D_4$  为组间二极管。

### 1.2 电池模组内均衡原理

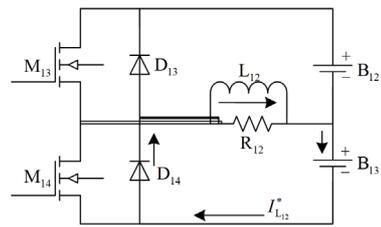
电池模组内 Buck-Boost 电路中开关管受 PWM 信号控制,在一个开关周期内,电路中电流回路有两种,如图 2 所示。假设电池  $B_{12}$  的电量大于  $B_{13}$ ,需导通开关管  $M_{13}$ ,电池  $B_{12}$  将部分电量转化为磁能储存在电感  $L_{12}$ ,此时电流回路如图 2(a)所示。开关管  $M_{13}$  关闭后,二极管  $D_{14}$  正向导通,电感  $L_{12}$  释放能量给电池  $B_{13}$  充电,电流回路如图 2(b)所示。

在图 2(a)中,电感  $L_{12}$  储能时电流  $I_{L_{12}}$  如式(1)所示。

$$I_{L_{12}} = \frac{V_{B_{12}}}{L_{12}} t, 0 < t < DT \quad (1)$$



(a)  $B_{12}$  放电



(b)  $B_{13}$  充电

图 2 电池模组内均衡过程

Fig. 2 Equalization process in battery module

式中:  $T$  表示开关周期;  $D$  表示占空比;  $V_{B_{12}}$  表示电池  $B_{12}$  电压。电感  $L_{12}$  释放能量时电流  $I'_{L_{12}}$  如式(2)所示。

$$I_{L_{12}}^* = \frac{V_{B_{12}}}{L_{12}}DT - \frac{V_{B_{13}}}{L_{12}}t, DT < t < T \quad (2)$$

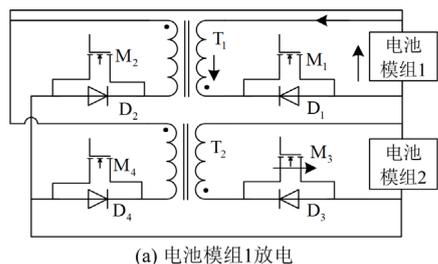
式中,  $V_{B_{13}}$  表示电池  $B_{13}$  电压。模组内其他电池按此方法完成均衡, 当模组内所有电池的 SOC 均方差小于 0.1 时, 组内均衡结束。

### 1.3 电池模组间均衡原理

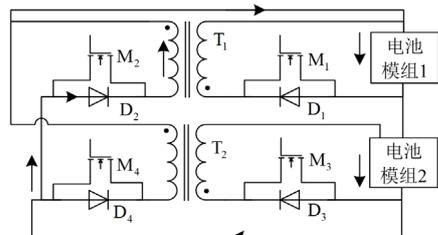
在利用隔离型双向反激变压器实现电池模组均衡时, 电池模组间均衡有两种工作状态: 工作状态 1, 高能量模组将部分能量转移到整个串联电池组; 工作状态 2, 串联电池组将部分能量转移到较低模组中, 以实现串联电池组均衡。

#### 1) 工作状态 1

工作状态 1 下工作电流如图 3 所示。假设电池模组 1 能量较高, 需要导通开关管  $M_1$ , 电池模组 1 将部分电能转化为磁能储存在变压器  $T_1$  中, 此时电流回路如图 3(a)所示。当开关管  $M_1$  关闭后, 变压器  $T_1$  副边绕组通过二极管  $D_2$  将储存的磁能转化为电能并转移到整个串联电池组中, 电流回路如图 3(b)所示。



(a) 电池模组1放电



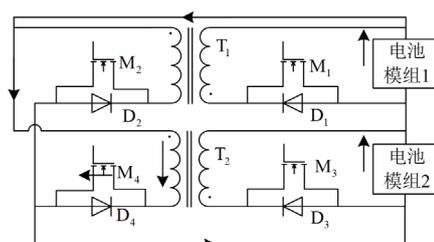
(b) 串联电池组充电

图 3 工作状态 1

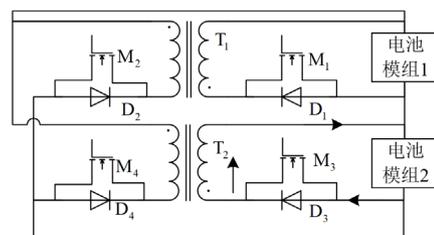
Fig. 3 Working state 1

#### 2) 工作状态 2

工作状态 2 下工作电流如图 4 所示。假设电池模组 2 能量较低, 则需要将开关管  $M_4$  导通, 串联电池组部分电能转化为磁能储存在变压器  $T_2$  中, 此时电流回路如图 4(a)所示。开关管  $M_4$  关闭后, 变压器  $T_2$  通过续流二极管  $D_3$  将储存的磁能转化为电能并转移到电池模组 2 中, 电流回路如图 4(b)所示。



(a) 串联电池组放电



(b) 电池模组2充电

图 4 工作状态 2

Fig. 4 Working state 2

## 2 电池组均衡控制策略设计

通过对电池特征进行分析, 常见均衡变量有电池电压、电池容量和电池 SOC。考虑到电池 SOC 能够表征电池整体性能, 本文以电池 SOC 为均衡变量, 采用组内和组间同时均衡的控制策略, 来提高串联电池组的均衡效率。

### 2.1 电池组均衡流程

图 5 所示为串联电池组整体均衡控制流程。首先计算各单体电池 SOC, 当电池模组内 SOC 均方差  $S_{OC,MSE}$  大于 0.1 时, 启动模组内均衡。同时计算电池模组内 SOC 平均值  $\overline{S_{OC,m}}$ , 作为模组间均衡变

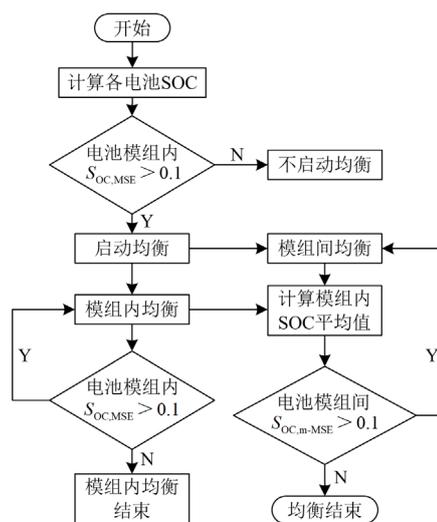


图 5 均衡控制流程图

Fig. 5 Equalization control flow chart

量。当电池模组间 SOC 均方差  $S_{OC,m-MSE}$  小于 0.1 时, 均衡结束。

### 2.2 自适应模糊 PID 算法

组内均衡和组间均衡方法均采用自适应模糊 PID (adaptive fuzzy PID, AF-PID) 算法, 自适应模糊 PID 结构如图 6 所示。以电池荷电状态差  $S_{OC,d}$  和荷电状态平均值  $S_{OC,av}$  作为输入量, 通过模糊准则进行模糊推理, 得到 PID 控制的 3 个增益系数  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$ , 再通过 PID 控制调节受控参数, 从而对受控对象进行控制。

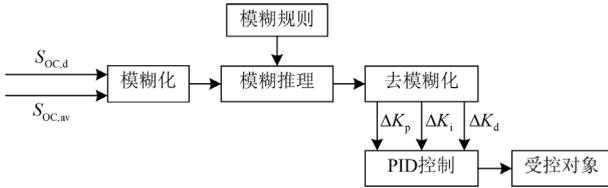


图 6 自适应模糊 PID 结构  
Fig. 6 Adaptive fuzzy PID structure

自适应模糊 PID 设计过程包括参数设置、隶属度函数设计、模糊规则设计和去模糊化 4 部分。

#### 1) 模糊控制器参数设置

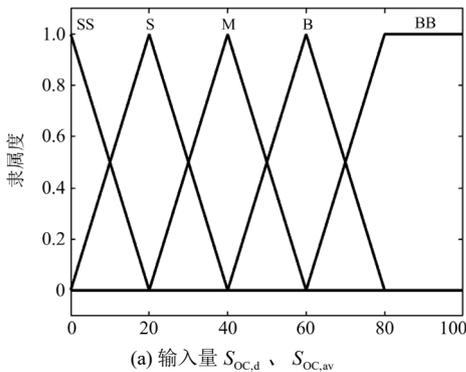
自适应模糊 PID 输入量为  $S_{OC,d}$  和  $S_{OC,av}$ , PID 控制的  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$  为输出量。两个输入参数模糊论域均为 [0 100], 输出参数模糊论域为 [-3 3]。输入采用 5 个模糊变量, 模糊集为 [SS S M B BB], 分别表示为极小、小、中、大、极大。输出采用 4 个模糊变量, 模糊集为 [SS S M B]。

#### 2) 模糊控制器隶属度函数设计

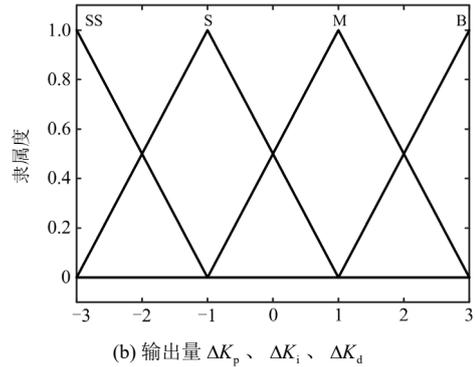
在确定输入输出变量的模糊论域后, 需要确定模糊控制器隶属度函数。隶属度函数包括三角形隶属度函数、高斯隶属度函数等, 本文使用三角形隶属度函数。输入输出变量的隶属度函数如图 7 所示。

#### 3) 模糊控制规则设计

模糊控制规则通常是由模糊理论中模糊条件语句 if-else 来描述, 在电池均衡开始时,  $S_{OC,d}$ 、 $S_{OC,av}$



(a) 输入量  $S_{OC,d}$ 、 $S_{OC,av}$



(b) 输出量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$

图 7 输入量和输出量的隶属度函数

Fig. 7 Membership function of input and output

差值较大, 此时需要较大的  $\Delta K_p$ 、较小的  $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$ 。随着时间的推移,  $S_{OC,d}$  逐渐减小, 此时需要采用较小的  $\Delta K_p$ 、较大的  $\Delta K_d$ ,  $\Delta K_i$  应较小或取零。但是在  $S_{OC,d}$ 、 $S_{OC,av}$  超调时, 为了避免较大的均衡电流, 需采用大小合适的  $\Delta K_p$ 、较大的  $\Delta K_d$ 。

根据上述规则, 建立如表 1—表 3 所示具体模糊规则表。

表 1  $\Delta K_p$  模糊规则

Table 1  $\Delta K_p$  fuzzy rules

$S_{OC,av}$	$S_{OC,d}$				
	SS	S	M	B	BB
SS	SS	S	S	M	B
S	S	B	B	M	M
M	M	B	B	M	S
B	B	M	M	S	SS
BB	B	M	S	SS	SS

表 2  $\Delta K_i$  模糊规则

Table 2  $\Delta K_i$  fuzzy rules

$S_{OC,av}$	$S_{OC,d}$				
	SS	S	M	B	BB
SS	SS	B	M	SS	SS
S	S	B	M	SS	SS
M	M	B	B	S	SS
B	B	B	M	S	S
BB	B	B	M	S	S

表 3  $\Delta K_d$  模糊规则

Table 3  $\Delta K_d$  fuzzy rules

$S_{OC,av}$	$S_{OC,d}$				
	SS	S	M	B	BB
SS	B	S	SS	S	S
S	B	S	SS	S	SS
M	B	B	S	S	SS
B	B	S	S	S	SS
BB	B	S	SS	S	SS

#### 4) 去模糊化

经过模糊推理后得到的结论是以模糊集合来表示的, 因此需要将其转化为一个明确的数值。常见的去模糊化方法有面积中心法、极值法、最大隶属度法等。本文选择最大隶属度法, 最后输出结果即为 PID 控制中的参数。

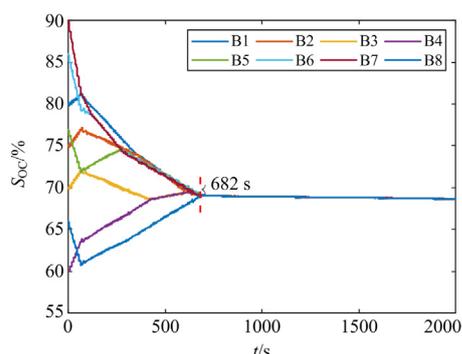
### 3 仿真实验及分析

为了验证所提均衡结构和均衡策略的正确性, 以 8 节串联电池为例, 在 Matlab/Simulink 中搭建电池均衡仿真模型。为降低模型复杂度, 以 Simulink 中 Battery 模块为单体电池, 电池标称电压为 3.7 V, 额定容量为 2 Ah, 内阻为 0.013  $\Omega$ 。均衡拓扑中储能电感值设为 1 H, MOSEFT 管的值为默认值。

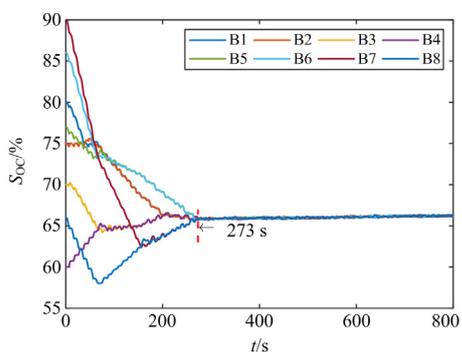
电池有 3 种工作状态: 静置状态、充电状态和放电状态。分别以电池 3 种工作状态为例对串联电池组进行均衡, 并与传统的基于 Buck-Boost 电路均衡进行对比。

#### 1) 电池组静置均衡

8 节串联电池初始 SOC 范围在 60%~100%, 图 8 展示了静置均衡时各电池 SOC 变化。



(a) 传统均衡



(b) 本文均衡

图 8 静置均衡

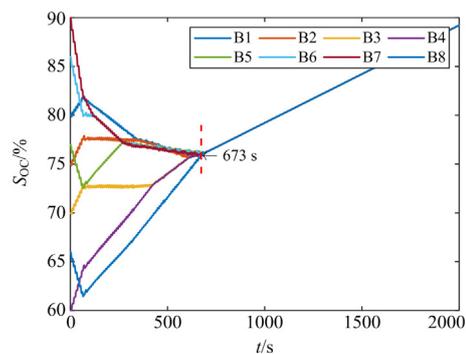
Fig. 8 Static equilibrium

从图 8 实验结果可以看出: 传统均衡控制方法达到均衡的时间较长。本文所提均衡控制方法能够

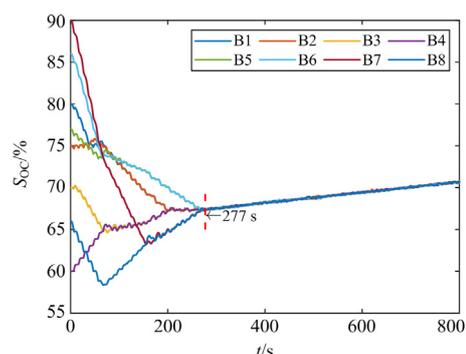
在 273 s 内完成电池组均衡, 而传统均衡控制方法则需要 682 s 左右完成, 本文提出的均衡控制方法的均衡时间较传统均衡缩短了 409 s。

#### 2) 电池组充电均衡

图 9 为电池组充电均衡时各电池 SOC 变化。以 2 A 充电电流对串联电池组进行充电, 单体电池各参数设置一致, 只有初始 SOC 不一致。



(a) 传统均衡



(b) 本文均衡

图 9 充电均衡

Fig. 9 Charge equilibrium

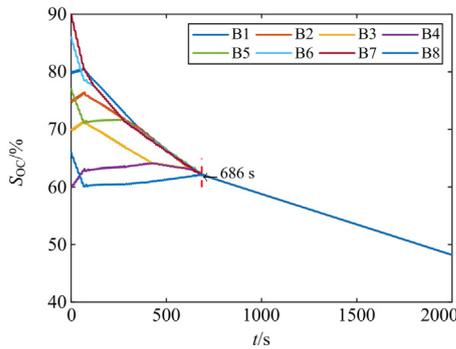
从图 9 可以看出: 电池组被均衡后, 8 个电池的 SOC 不一致性显著改善。本文所提均衡控制策略在 277 s 左右完成均衡, 而传统均衡策略则需要大约 673 s 完成电池均衡, 本文提出的均衡策略的均衡时间明显缩短。

#### 3) 电池组放电均衡

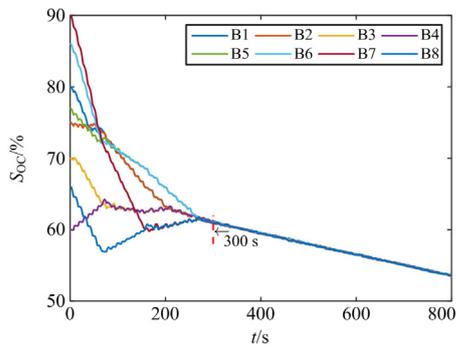
采用 -2 A 的放电电流, 放电均衡结果如图 10 所示。从图 10 可以看出: 传统均衡需要 686 s 的时间才能完成, 而本文均衡只需要 300 s, 电池组均衡时间效率明显提高。

综合以上实验结果, 相比较传统 Buck-Boost 均衡结构, 本文所提均衡结构和均衡策略在电池静置状态、充电状态和放电状态下, 均衡时间分别缩短了 409 s、396 s 和 386 s, 对应的均衡时间效率分别提高了 59.97%、58.84%和 56.27%。可以看出均

衡时间效率显著提高, 有效地改善了电池组的不一致性。



(a) 传统均衡



(b) 本文均衡

图 10 放电均衡

Fig. 10 Discharge equilibrium

### 4 结论

为了提高规模化电池重组均衡效率, 缩短均衡时间, 降低均衡复杂度, 提出了一种锂电池组双层均衡结构和自适应模糊 PID 均衡控制策略。以 8 节电池组成的串联电池组为例, 通过在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型, 在电池静置状态、充电状态和放电状态三种工作状态下分别进行了对应的电池组均衡仿真实验。仿真实验结果表明, 本文提出的电池组均衡方法比传统的基于 Buck-Boost 电路均衡时间更短, 能够更好地实现串联电池组的快速均衡, 有效地缩短了电池组的均衡时间。

### 参考文献

[1] 任碧莹, 孙佳, 孙向东, 等. 提高串联锂电池 SOC 在线估计快速性的简化二阶模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 110-118.  
REN Biying, SUN Jia, SUN Xiangdong, et al. A simplified second-order model for improving the speed of on-line state of charge estimation of series lithium-ion batteries[J]. Power System Protection and Control, 2022,

50(22): 110-118.  
[2] 李建林, 郭兆东, 曾伟, 等. 面向调频的锂电池储能建模及仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 33-42.  
LI Jianlin, GUO Zhaodong, ZENG Wei, et al. Modeling and simulation analysis of lithium battery energy storage oriented to frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 33-42.  
[3] 董浩, 毛玲, 赵晋斌. 基于充电数据片段和 GA-ELM 的锂电池 SOH 在线估计[J]. 供用电, 2022, 39(7): 25-31.  
DONG Hao, MAO Ling, ZHAO Jinbin. Online estimation of lithium battery SOH based on charging data fragment and GA-ELM[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(7): 25-31.  
[4] 夏向阳, 邓子豪, 张嘉诚, 等. 基于动力锂离子电池健康状态的全寿命周期优化充电策略[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 17-24.  
XIA Xiangyang, DENG Zihao, ZHANG Jiacheng, et al. Life cycle optimal charging strategy based on the SOH of power lithium ion battery[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 17-24.  
[5] LUO S, QIN D, WU H, et al. Multi-cell-to-multi-cell battery equalization in series battery packs based on variable duty cycle[J]. Energies, 2022, 15(9): 3263.  
[6] 程从智, 徐晨, 戴珂, 等. MMC-BESS 电池荷电状态三级均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 100-108.  
CHENG Congzhi, XU Chen, DAI Ke, et al. Three-level balancing control for battery state-of-charge based on MMC-BESS[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 100-108.  
[7] 蔡敏怡, 张娥, 林靖, 等. 串联锂离子电池组均衡拓扑综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5294-5311.  
CAI Minyi, ZHANG E, LIN Jing, et al. Review on balancing topology of lithium-ion battery pack[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5294-5311.  
[8] 华咏, 周思达, 何榕, 等. 车用锂离子动力电池组均衡管理系统研究进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(20): 73-84.  
HUA Yang, ZHOU Sida, HE Rong, et al. Review on lithium-ion battery equilibrium technology applied for EVs[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(20): 73-84.  
[9] 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.

- [10] 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.
- [11] 王鹿军, 单恩泽. 基于动态式双阈值的锂电池组主被动均衡策略[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(1): 126-136.  
WANG Lujun, SHAN Enze. Active passive equalization strategy for lithium battery pack based on dynamic dual threshold[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(1): 126-136.
- [12] 刘威, 唐传雨, 王天如, 等. 串联电池组主动均衡拓扑及控制策略研究[J]. 电源学报, 2022, 20(3): 161-169.  
LIU Wei, TANG Chuanyu, WANG Tianru, et al. Research on active equalization topology of series battery pack and its control strategy[J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(3): 161-169.
- [13] 张亚楠, 梁志华, 罗欣儿, 等. 基于双向反激变换器的电池组主动均衡系统[J]. 电力电子技术, 2021, 55(7): 1-6, 45.  
ZHANG Yanan, LIANG Zhihua, LUO Xiner, et al. Active balancing system of battery pack based on bidirectional flyback converter[J]. Power Electronics, 2021, 55(7): 1-6, 45.
- [14] 张彦会, 孟祥虎, 肖婷, 等. 串联锂电池组分层均衡设计[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 35-39.  
ZHANG Yanhui, MENG Xianghu, XIAO Ting, et al. Design of lithium-ion batteries hierarchical balance[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 36(6): 35-39.
- [15] 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.  
LIU Zhengyu, SUN Qing, MA Yadong, et al. Energy-transferring equalization scheme based on Boost-Buck circuit[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(9): 73-79.
- [16] 程俊, 曲妍, 李媛, 等. 基于剩余电量估计的电池组充放电均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 122-129.  
CHENG Jun, QU Yan, LI Yuan, et al. Charge and discharge equalization strategy for battery packs based on remaining capacity estimation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 122-129.
- [17] SWAMINATHAN N, MATTHIAS K, SEBASTIAN S, et al. Modular active charge balancing for scalable battery packs[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2017, 25(3): 974-987.
- [18] GEORGE G A, CHACKO F M, PRINCE A, et al. Charge equalisation of electric vehicle battery system using intelligent controller[J]. International Journal of Vehicle Design, 2022, 89(3-4): 236-255.
- [19] 杜海忠, 骆滔, 宋浩谊, 等. 基于电压平衡的锂电池主动均衡电路及策略[J]. 电气工程学报, 2021, 16(3): 145-151.  
DU Haizhong, LUO Tao, SONG Haoyi, et al. Active balancing circuit and strategy of li-ion battery based on voltage balance[J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(3): 145-151.
- [20] 安治国, 金昌理, 虬建建. 关于电动汽车动力电池能量转移均衡控制设计[J]. 计算机仿真, 2017, 34(5): 147-150, 252.  
AN Zhiguo, JIN Changli, QIE Jianjian. Equilibrium control design of power battery energy transfer in electric vehicle[J]. Computer Simulation, 2017, 34(5): 147-150, 252.
- [21] 李伟, 吴靖, 郑伟彦, 等. 基于双向反激变换器的电池均衡电路研究[J]. 电源技术, 2022, 46(1): 85-88.  
LI Wei, WU Jing, ZHENG Weiyan, et al. Research on battery equalization circuit based on bidirectional flyback converter[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(1): 85-88.
- [22] CAO Jianwen, XIA Bizhong, ZHOU Jie. An active equalization method for lithium-ion batteries based on flyback transformer and variable step size generalized predictive control[J]. Energies, 2021, 14(1): 207.
- [23] LIU Xintian, SUN Yafei, HE Yao, et al. Battery equalization by fly-back transformers with inductance, capacitance and diode absorbing circuits[J]. Energies, 2017, 10(10): 1482.

收稿日期: 2023-05-11; 修回日期: 2023-09-08

作者简介:

吴文进(1975—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力电子系统及其控制、电能储存与节电技术; E-mail: wuwenjinaq@163.com

郭海婷(1998—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为储能电池建模和储能系统控制; E-mail: guohaiting714@126.com

苏建徽(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为新能源发电技术、储能技术和氢能利用技术。E-mail: su\_chen@126.com

(编辑 魏小丽)