

基于能量分配的退役电池组均衡方法^{*}

廖 力 李勋波 杨 达 姜久春

(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:针对退役电池组存在明显的不一致性问题,提出一种高效的可重构的均衡电路,该电路可以接入或旁路任意电池,以满足多个电池同时均衡的需求。在此基础上提出一种基于能量分配的均衡方法,通过非线性规划遗传算法求解各单体电池每个周期能量分配比例,从而计算出单体电池接入时长。同时在均衡过程中动态控制开关保持电池组接入电池数量固定,能有效避免可重构均衡电压波动大的问题。在 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型验证,结果表明,与传统可重构均衡方法相比,所提方法在均衡过程中可以有效地保持电池组电压的稳定;与传统求解能量分配比例方法相比,所提求解方法在充电和放电状态下均衡时间分别减少约 12.31% 和 13.39%,验证了方法的有效性。

关键词:退役电池组;可重构均衡;能量分配;MATLAB/Simulink

中图分类号: TM912 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

Equalization method for decommissioned battery packs based on energy distribution

Liao Li Li Xunbo Yang Da Jiang Jiuchun

(Hubei Provincial Key Laboratory of Solar Energy Efficient Utilization and Energy Storage Operation Control,
Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: To address the more obvious inconsistency problem of retired battery packs, an efficient reconfigurable equalization circuit is proposed, which can bypass or access any battery to meet the demand of simultaneous equalization of multiple batteries. On this basis, an equalization method based on energy allocation is designed to solve the energy allocation ratio of each single battery in each cycle through a nonlinear planning genetic algorithm, so as to calculate the length of single battery access time. At the same time, the dynamic control switch keeps the number of accessed batteries fixed during the equalization process, which effectively avoids the problem of large fluctuation of reconfigurable equalization voltage. Finally, a simulation model is constructed in MATLAB/Simulink for verification, and the results show that compared with the traditional reconfigurable equalization method, the method proposed in this paper supports simultaneous equalization of multiple batteries and stabilizes the voltage of the battery pack during the equalization process. Compared with the traditional method of solving the energy distribution ratio, the proposed method reduces the equalization time by about 12.31% and 13.39% in the charging and discharging states, which confirms the effectiveness of this method.

Keywords: decommissioned battery packs; reconfigurable equilization; energy distribution; MATLAB/Simulink

0 引 言

锂离子动力电池作为电动汽车能量来源,在电动汽车中广泛使用,具有低自放电率、高能量密度、长循环寿命和无污染的特点^[1-2]。而目前大量锂离子电池从电动汽车中

退役,退役电池的容量为初始容量的 70%~80%,退役单体电池相比于新生产的电池不一致性更大,电池组容量“木桶效应”更明显且循环寿命变短^[3-4]。因此,引入一种有效的均衡拓扑以及均衡方法,减少退役电池组之间的一致性是非常有必要的。

收稿日期:2023-08-12

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52177212)、湖北省教育厅科学研究计划(T2021005)项目资助

目前均衡方式主要为被动、主动以及可重构均衡3类。被动均衡^[5]通过串并联电阻器来消耗多余的能量并以热量形式释放达到均衡目的,存在均衡效率不高、均衡时间长等不足之处。主动均衡^[6]采用外加储能元件和DC-DC变换器进行能量转移的思想提高电池组整体的不一致性,主动均衡电路类型包含电容型、电感型、变压器型、Buck-Boost变换器、Speic变换器以及各类谐振变换器等^[7]。文献[8]提出一种基于Buck-Boost准谐振均衡电路,利用软开关技术实现零电压导通,减少开关损耗,提高均衡电路效率。文献[9]利用双向四管变换器实现电池组与超级电容之间的双向流动实现均衡,并引入K-means聚类算法优先均衡电池组中不相邻的电池组,再均衡电池组内部“电池簇”。文献[10]采用Cuk均衡器结合双层选择开关的均衡拓扑,通过开关控制可以实现任意单体间能量传递,并设计了模糊逻辑控制算法动态调整均衡电流。不难发现主动均衡存在不足之处为能量在转移过程中速度有限、DC-DC控制较为复杂、能量转移效率不高以及电池组使用过程中存在单体电池失效,无法及时进行旁路操作。可重构均衡^[11]也称无能量转移型均衡,通过电池接入电池组充电或放电时长实现均衡,无需额外储能元件,具有均衡效率高,电路结构简单等优点,但在均衡过程中存在电池组电压波动的问题。文献[12]在传统可重构电路基础上通过增加一个直流变换器、3个开关和均衡电源的方式,替代被均衡的电池或故障电池实现均衡,存在与主动均衡中变换器控制复杂以及能量转移效率不高相同的问题。文献[13]通过将每节电池与较小的低功率DC-DC功率转换器连接,给每节电池分配不同出力系数来维持负载端电压的稳定从而实现均衡,但大量的DC-DC变换器导致成本较高。文献[14]提出一种无DC-DC变换器的新型可重构均衡电路,通过改变电池组串并联结构,将多组并联电池拆分为单个电池串联的可重构均衡电路。

本文提出一种高效的、可重构均衡电路,无需外加均衡器件,通过控制开关保持接入电池组数量固定实现稳压。在此基础上利用模型预测控制以最小化电池组电池荷电状态(state of charge, SOC)一致性为均衡目标,通过非线性规划遗传算法来获得最优充电和放电能量分配比例,从而计算各单体电池接入时长实现电池组均衡,最后在MATLAB/Simulink仿真平台验证了该方案的有效性。

1 均衡电路分析

1.1 可重构均衡拓扑

可重构均衡电路如图1所示。由 n 个单体电池串联组成, $2n$ 个开关组成, 包含 n 个接入开关和 n 个旁路开关, 通过开关 K_{i1} 与 K_{i2} ($i=1, 2, 3, \dots, n$)可以隔离任意单体电池, 改变单体电池接入状态。

1.2 可重构均衡原理分析

可重构均衡电路的详细分析可以参考文献[15], 为放电

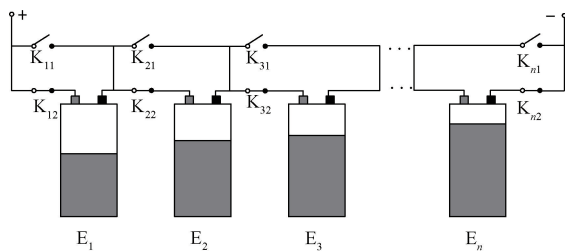
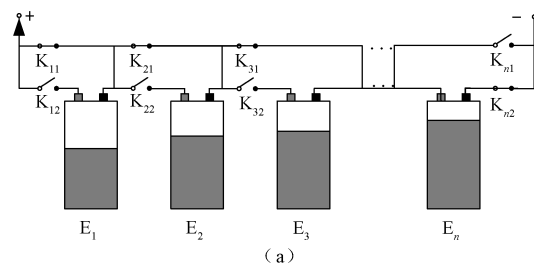
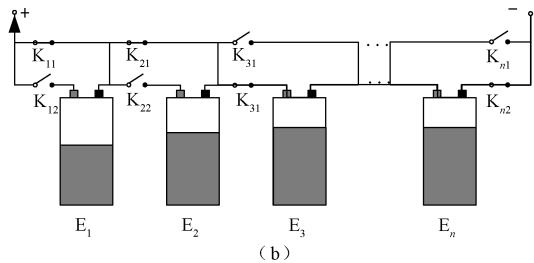


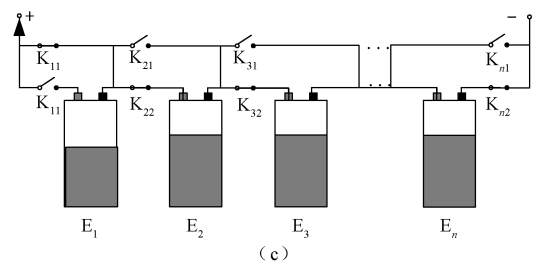
图1 可重构均衡电路



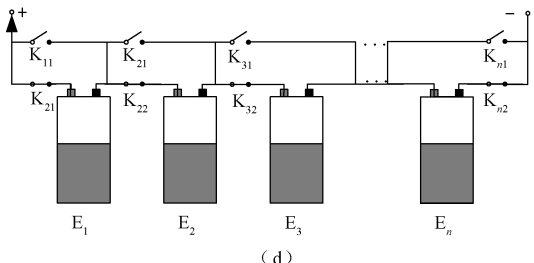
(a)



(b)



(c)



(d)

图2 可重构均衡过程

状态可重构均衡过程(图2(a)~(d)), 充电均衡原理类似。

默认该电池组为放电状态, 假设图2(a)中 $E_4 \sim E_n$ 电池SOC一致, $E_1 \sim E_3$ 次之, 其中 E_1 电池SOC最小, 此时 $E_4 \sim E_n$ 为负载提供能量, 开关 $K_{41} \sim K_{n1}$ 断开, 开关 $K_{42} \sim K_{n2}$ 闭合, $K_{11} \sim K_{31}$ 闭合, $K_{12} \sim K_{32}$ 断开, $E_1 \sim E_3$ 暂时被旁路。图2(b)中, 当 $E_4 \sim E_n$ 电池放电至与 E_3 电池SOC

一致时,此时 E_3 接入电池组,控制 E_3 电池开关动作, K_{31} 断开, K_{32} 闭合,此时由 $E_3 \sim E_n$ 电池为负载提供能量。图 2(c)中,当放 $E_3 \sim E_n$ 电池放电至与 E_2 电池 SOC 一致时,此时 E_2 接入电池组, K_{21} 断开, K_{22} 闭合。同理图 2(d)中,当电池 $E_n \sim E_2$ 放电至与 E_1 电池 SOC 相同时, K_{11} 断开, K_{21} 闭合,此时 $E_1 \sim E_n$ 全部接入为负载提供能量,均衡完毕。

通过上述分析可知,均衡过程中 SOC 较高的电池需放电至与 SOC 较低的电池一致时才接入电池组为负载提供能量,无法实现多个电池同时均衡且均衡过程中电池接入数量不断增加将会导致端电压波动较大。

1.3 本文所提出拓扑及均衡原理

本文提出的均衡电路如图 3 所示,在 1.2 节可重构均衡电路基础上,采用低功耗金属氧化物半导体场效应管 (metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) 代替 1.2 节可重构均衡电路中的单层开关。 S_i 与 S_i' 为一对互斥开关,采用极性相反信号进行控制,当电池组一致性较高时,接入开关始终保持闭合, MOSFET 维持在低功耗下运行。在实际均衡过程中为了避免控制信号出现误动作,二极管 D_i 在电路中作为保护作用,避免均衡过程中电池正负极短路。

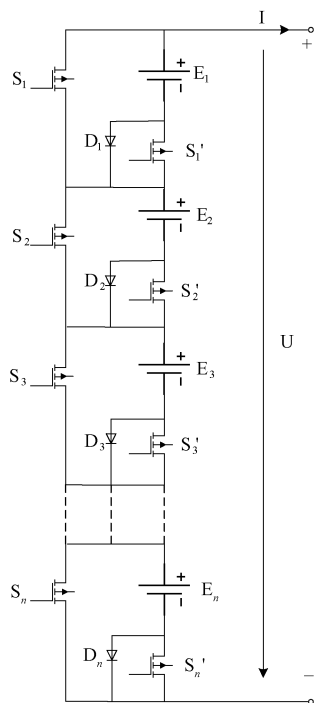


图3 本文提出的均衡电路

均衡原理是根据目标电压以及功率确定所接入电池组电池的节数,假设单体接入电池组数量为 $n-3$ 节,通过控制互斥开关保证任何时刻有 $n-3$ 节电池接入电池组均衡,3 节电池没有接入电池组,可以保证电池组端电压保持稳定且 $n-3$ 节电池同时在均衡。并将均衡过程可分为

多个周期 T ,每个周期内不同电池接入电池组时间不一样,电池实现动态接入。在放电状态下,能量高的电池接入电池组时间长,反之能量低的电池接入电池组时间短,充电状态下,能量低的电池接入电池组时间长,反之能量高的电池接入电池组时间短。每个周期内各单体电池接入电池组的时长 (t_1, t_1, t_3, t_i) 通过能量分配比例 β_i 求得,如式(1)。

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ \vdots \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \vdots \\ \beta_i \end{bmatrix} \cdot \lambda \cdot T \quad (1)$$

其中 λ 为单体电池接入电池组数量,各单体电池在一个周期内充电或放电时间满足式(2)。

$$t_i = \beta_i \cdot \lambda \cdot T \leq T \quad (2)$$

在实际中电池数量可根据输出电压以及输出功率的要求进行选择,但选择接入电池数量太少,容易产生较大的均衡电流以至于超出电池最大放电电流,因此需要对均衡过程中电池接入电池组数量进行限定和设置充电或放电电流上下限。

本文所提出均衡电路结构简单,易于扩展,无需额外均衡元器件,有效避免有源均衡在能量转移过程中的能量损耗。同时也降低了均衡成本以及控制难度,另外在均衡过程中存在单体电池热失控可以及时进行旁路。

2 均衡策略分析

均衡变量是均衡策略的基础,目前均衡变量主要分为两种^[16],电池端电压和电池荷电状态。以电压为均衡变量,一定程度取决于电压传感器采集精度,而荷电状态是电池电压、内阻等参数的综合表征,以荷电状态为均衡变量能够从本质上改善电池的不一致性,因此本文选取荷电状态作为均衡变量。选取均衡变量后,均衡阈值的选取对均衡精度有重要影响,常用的均衡阈值为荷电状态极差、标准差等,其中标准差 Δ 能较好的反应电池不一致性。本文选取电池组荷电状态标准差作为均衡阈值,均衡流程如图 4 所示。

2.1 基于 SOC 模型预测

锂离子电池是一个非线性系统,在选择均衡控制方法时,应具备实时控制、应用于非线性系统以及处理多约束条件的能力。模型预测控制^[17] (model predictive control, MPC) 考虑系统的约束条件,能较好的处理多变量非线性系统,具有较强的鲁棒性。通过构建精确的预测模型,根据当前时刻的信息和未來一段时间的初始条件,滚动优化目标方程获得一组最优控制序列,将目标函数最小值作为系统的输出。根据锂离子电池状态方程结合安时积分法建立 SOC 模型预测如下:

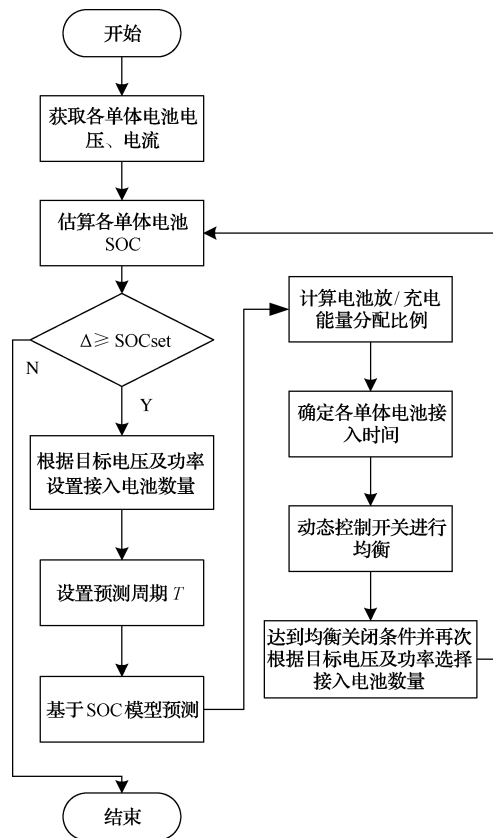


图4 均衡流程

$$\begin{bmatrix} SOC_{1(k+1)} \\ SOC_{2(k+1)} \\ SOC_{3(k+1)} \\ \vdots \\ SOC_{\lambda(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SOC_{1(k)} \\ SOC_{2(k)} \\ SOC_{3(k)} \\ \vdots \\ SOC_{\lambda(k)} \end{bmatrix} - \frac{\eta \cdot t \cdot I}{Q_n} \quad (3)$$

由式(1)、(3)可知,各单体电池能量分配比例为:

$$\begin{bmatrix} \beta_1(k) \\ \beta_2(k) \\ \beta_3(k) \\ \vdots \\ \beta_{\lambda}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SOC_{2(k)} - SOC_{2(k+1)} \\ SOC_{2(k)} - SOC_{2(k+1)} \\ SOC_{3(k)} - SOC_{3(k+1)} \\ \vdots \\ SOC_{\lambda(k)} - SOC_{\lambda(k+1)} \end{bmatrix} / \frac{\lambda \cdot \eta \cdot T \cdot I}{Q_n} \quad (4)$$

预测周期设置为 T , 步长为 1, 其中 Q_n 为锂离子最大可用电池容量, η 为充放电效率, 本文为恒流充放电, 此时电流 I 设置为定值。 $SOC_{i(k)}$ 第 i 个电池 k 时刻的荷电状态, $SOC_{i(k+1)}$ 为 $SOC_{i(k)}$ 通过安时积分法所得到的 $k+1$ 时刻的预测值, 本文将电池组一致性作为目标函数:

$$J = \min \sum_{i=1}^n \| y_i(k+1) - \overline{y_i(k)} \| \quad (5)$$

式中: $\overline{y_i(k)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y(i)$, n 为电池数量, y_i 为第 i 个电 SOC, $\overline{y_i(k)}$ 表示电池组经过一个周期充电或放电后的 SOC 平均预测值。

上述目标式可以转化为传统二次规划^[18]问题求解能量分配比例, 调用 MATLAB/Simulink 中 mpcqpsolver 函数。本文对各单体电池充电和放电能量分配比例 β_i 的计算转化为非线性规划问题求解, 采用非线性规划遗传算法求解各单体电池在每个周期内最优能量分配比例。

上述目标函数式的约束条件如式(6)和(7)。式(6)中为各单体能量分配比例 β_i 约束条件; 式(7)中包含了 SOC、 I 、 U 不等式约束, 本文采用恒流充放电, 但实际均衡中需对电流和电压进行约束, 为保护电池以防止电池过充或过放导致安全事故。

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \dots + \beta_n = 1 \quad (6)$$

$$\begin{cases} SOC_{\min} \leq SOC(k) \leq SOC_{\max} \\ I_{\min}(k) \leq I(k) \leq I_{\max}(k) \\ U_{\min}(k) \leq U(k) \leq U_{\max}(k) \end{cases} \quad (7)$$

2.2 非线性规划遗传算法(NLPGA)寻优能量分配比例

NLPGA 算法^[19]将非线性规划的局部搜索能力与遗传算法的全局搜索能力相结合, 获得参数的全局最优解。本文采用非线性规划遗传算法寻找各单体电池每个周期的最优充电或放电能量分配比例。算法流程如图 5 所示, 参数进行设置如下, 种群规模为 40, 最大迭代次数为 30 次, 交叉概率为 0.6, 变异概率为 0.01。

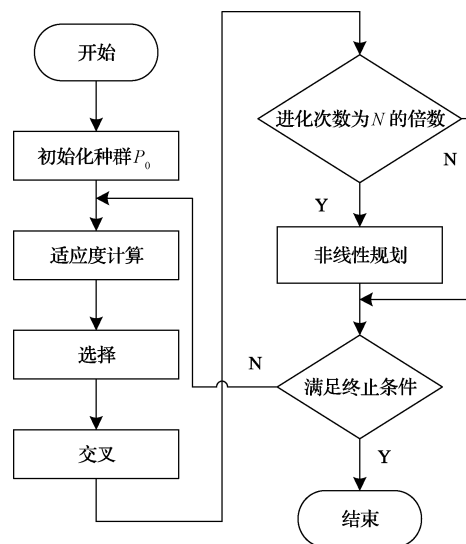


图5 NLPGA 原理

首先将需要被优化的参数作为初始种群, 本文选取各单体电池的充电和放电能量分配比例, 一般范围为 $[0, 0.15]$ 。每个种群根据适应度函数计算适应度值, 适应度值可区分参数的性能, 其次再进行选择、交叉和变异作为遗传算法搜索算子。当进化的次数为 N 倍数时, 以遗传算法当前计算值为初始值, 采用非线性规划算法可以加快寻优速度, 利用 MATLAB 优化工具中线性函数 fmincon 寻找局部最优解, 并将局部最优值作为新的个体。

3 仿真分析

为了进一步证明所提出的均衡电路以及均衡策略的有效性,本文在 MATLAB2022a/Simulink 搭建均衡模型进行仿真,配置如下:锂离子电池标称电压 3.7 V,标准容量为 3.4 AH,二极管为线性二极管,旁路以及接入开关为 PNP 型 MOSFET。充放电效率为 0.97,充放电倍率均设置为 0.5 C,电池组的标准差 Δ 阈值设置为 0.001 5,当标准差小于等于 0.001 5 时,均衡结束。假设目标电压以及负载功率仅需 7 节电池提供。

为突显退役电池容量差异性,设置 10 块不同 SOC 单体电池且初始不一致性程度较高,放电状态下 $B_1 \sim B_{10}$ 电池初始 SOC 值分别设置为 78.02%、75.09%、72.16%、69.23%、66.30%、63.37%、60.44%、57.51%、54.58%、51.64%。

传统可重构放电均衡状态效果如图 6 所示,均衡电路为 1.2 节中所示,均衡策略采用极差法。考虑到仅需 7 节电池为负载供电,因此在对 10 节电池电压均衡时,优先考虑 SOC 依次偏低的 3 节电池应处于旁路状态,均衡开始时,电池组端电压为 26.83 V,电池 $B_8 \sim B_{10}$ 不参与电路放电过程,并以 SOC 最高 B_1 电池的为基准,当 $B_8 \sim B_{10}$ 电池 SOC 值依次与 B_1 电池相等时, $B_8 \sim B_{10}$ 依次接入电池组参与放电,约在 1 610 s 完成。此时 $B_5 \sim B_7$ 旁路开关打开,未接入电池组中,直到 B_7 电池 SOC 与 B_1 、 $B_8 \sim B_{10}$ 电池 SOC 一致时, $B_5 \sim B_7$ 电池均衡完毕。依次类推 $B_2 \sim B_4$ 电池与 B_1 、 $B_5 \sim B_{10}$ 电池 SOC 一致时,约在 3 321 s,最终完成均衡,此时电池组端电压约为 34.7 V。可知传统可重构均衡电路在均衡过程中电池有少量电池接入导致电池电压波动。

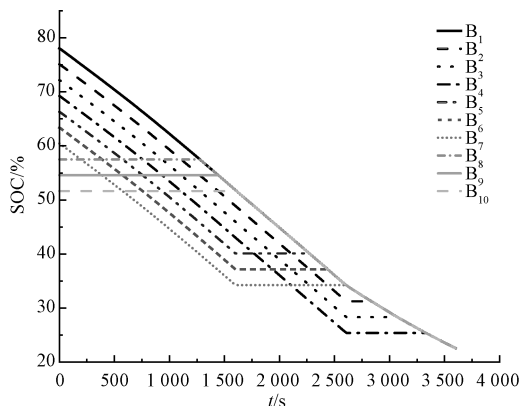


图6 传统可重构放电均衡效果

本文所提出方法放电均衡效果如图 7 所示,周期设置为 15 s,接入电池数量根据所假设的目标电压及功率,设置为 7 块。均衡开始时,判断出 $B_1 \sim B_{10}$ 中 7 个较高 SOC 电池接入电池组中,7 个电池具有相同的放电比例,通过计算约为 0.142 8,此时端电压约为 26.83 V。均衡

过程中电池组始终保持 7 块单体电池接入电池组,电池组电压保持稳定。在均衡结束时,电池组一致性较高,假设 10 块电池全部接入电池组中供电,端电压会小幅增加,此时端电压约为 35.7 V,但考虑到目标电压仅需 7 节电池提供,本文在电池组均衡完毕后仍然可以保持 7 节电池动态接入电池组,此时电池组电压约为 25.06 V。可知本文所提均衡方法能较好解决传统可重构均衡电压波动大的问题,并通过计算放电能量分配比例,得出各电池每个周期接入时长实现均衡,最终本文所提方法均衡时间约为 2 240 s。

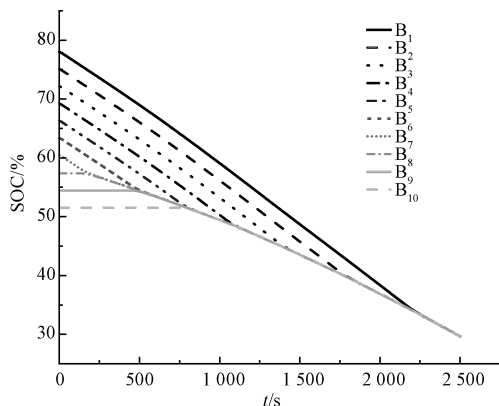


图7 本文所提方法放电均衡效果

本文所提出的均衡方法放电状态下电池组 SOC 标准差如图 8 所示,均衡开始时各单体电池标准差为 0.089 7,一致性较差,均衡结束时为 0.001 5,实现较高精度的均衡效果,证实了本文所提方法的有效性。

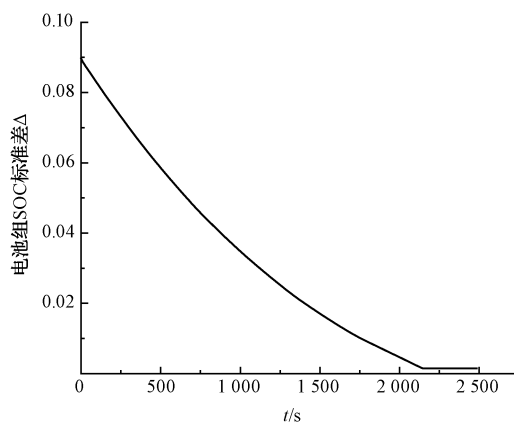


图8 放电状态电池组标准差

表 1 所示为电池组放电状态下均衡开始时与均衡结束时电池组端电压,分别对比了传统可重构均衡方法、文献[14]所提出的稳压方法。本文所提出的均衡方法在均衡结束时仍能保持 7 节电池动态接入电池中,相比于传统可重构均衡方法以及文献[14]的均衡方法,本文所提方法电压波动较小,仅为 1.77 V。

表 1 放电均衡前后电压对比 (V)

电压	传统可重构	文献[14]	本文方法
均衡开始时	26.83	25.97	26.83
均衡结束时	34.7	29.67	25.06
极差	7.87	3.7	1.77

电池组放电状态下本文所提出的方法与传统转化为二次规划的方法求解放电能量分配比例 β 分别如图9和10所示。由图9可知,本文所提方法约2240 s实现了均衡,图10为传统算法在求解放电比例出现较大的波动,约在2540 s实现了均衡,可知本文所提求解方法在寻找最优放电能量分配比例速度较快,均衡时间缩短了约300 s。

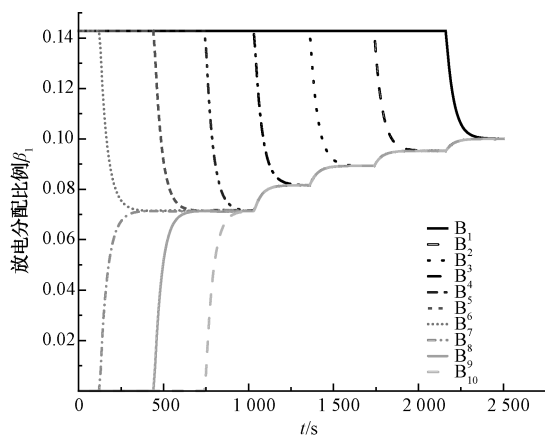


图9 放电状态本文所提求解方法

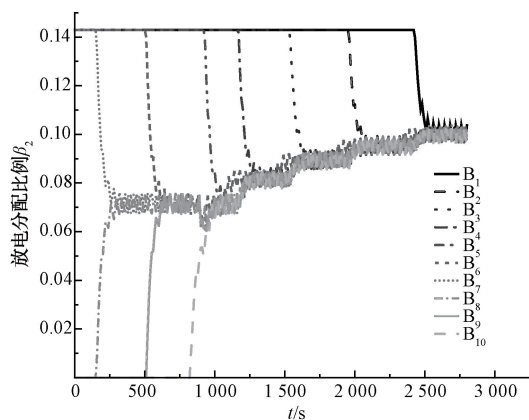


图10 放电状态传统求解方法

同理设置充电状态下 $B_1 \sim B_{10}$ 电池SOC且初始不一致性程度较高,分别为48.71%、45.78%、42.85%、39.92%、37.00%、34.06%、31.13%、28.20%、25.27%、22.34%。

充电状态下传统可重构均衡效果如图11所示,考虑目标负载电压仅需7节电池提供,因此优先考虑较高电池SOC的3节电池进行旁路均衡,并以较低SOC电池 B_{10} 为基准。均衡开始时,电池组电压约为25.52 V,由于

$B_1 \sim B_3$ 电池SOC较高,此时 $B_1 \sim B_3$ 电池旁路开关打开。当 B_1 电池与 $B_2 \sim B_3$ 、 B_{10} 电池SOC一致时,约在1809 s $B_1 \sim B_3$ 电池全部接入负载供电。 $B_1 \sim B_3$ 电池均衡完毕后, $B_4 \sim B_6$ 电池旁路开关打开,分别约在2610、2808、3000 s接入开关打开。直至 B_6 电池接入电池组中时, $B_7 \sim B_9$ 电池旁路开关打开,约在3850 s时, B_7 电池接入电池组中,全部电池参与放电,此时电池组电压为38.2 V。

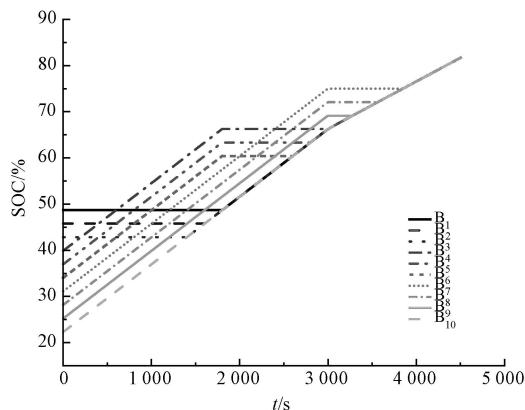


图11 传统可重构充电均衡效果

本文所提方法充电均衡效果如图12所示,周期为15 s,接入电池数量保持7个。均衡开始时,优先考虑SOC较低的电池 $B_4 \sim B_{10}$ 接入电池组中充电,而 $B_1 \sim B_3$ 电池SOC较高未接入电池组中参与充电,此时 $B_1 \sim B_3$ 充电能量分配比例为0,端电压约为25.52 V。均衡过程中 $B_4 \sim B_{10}$ 充电能量分配比例依次下降,而 $B_1 \sim B_3$ 逐渐升高。在均衡完毕时,电池组一致性较高,但考虑到目标电压仅需7节电池提供,本文方法在电池组均衡完毕后仍然可以保持7节电池动态接入,此时电池组电压约为26.74 V,所提方法均衡时间约为2680 s。

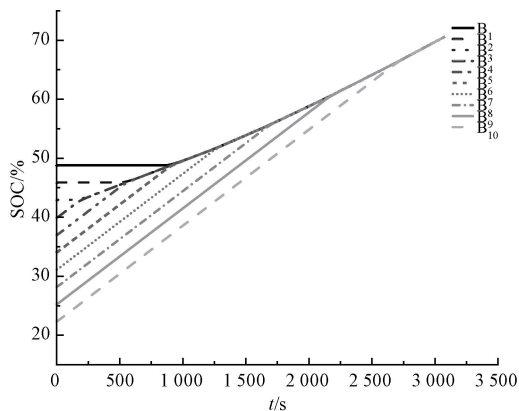


图12 本文所提方法充电均衡效果

表2所示为电池组充电状态下均衡开始时与均衡结束时电池组端电压,由于文献[14]仅做了放电均衡仿真实验,因此将所提出的方法与传统可重构均衡方法进行对比,本文所提出的方法比传统可重构均衡方法极差减少了11.46 V。

表2 充电均衡前后电压对比 (V)

电压	传统可重构	文献[14]	本文方法
均衡开始时	25.52	—	25.52
均衡结束时	38.2	—	26.74
极差	12.68	—	1.22

图13所示充电状态下电池组SOC标准差,均衡开始时电池组的一致性较差,随着均衡开始,电池组一致性逐渐减小,最终标准差减少到所设置的均衡阈值0.0015,实现较高精度的均衡效果。

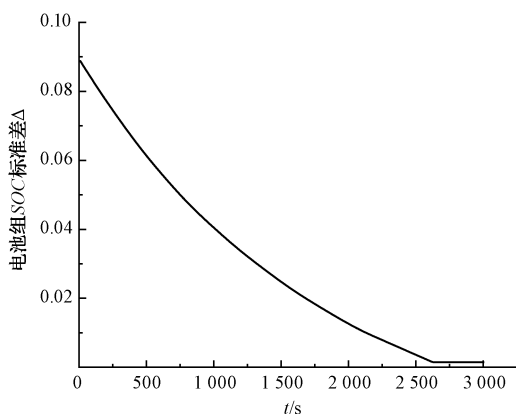


图13 充电状态电池组标准差

图14和15所示为充电状态下,分别为本文所提出方法和传统转化为二次规划的方法求解方法能量分配比例变化。本文所提出方法约2680s完成均衡,传统方法约3010s实现均衡,采用本文方法均衡时间约缩短了约330s。

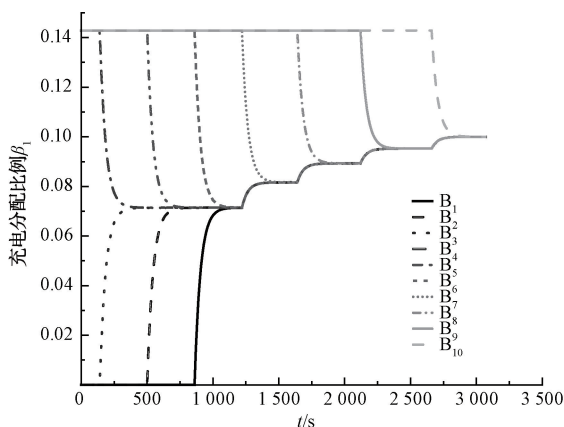


图14 充电状态本文所提求解方法

4 结 论

本文采用一种高效的、可重构均衡电路,该均衡电路主要由电池模块、开关模块以及二极管组成,无需外加均衡元器件且支持多个电池同时均衡;均衡策略采用基于能量分配的方法求解各单体电池在每个周期的能量分配比例,从而确定各单体电池接入电池组的时长,并通过动态控制

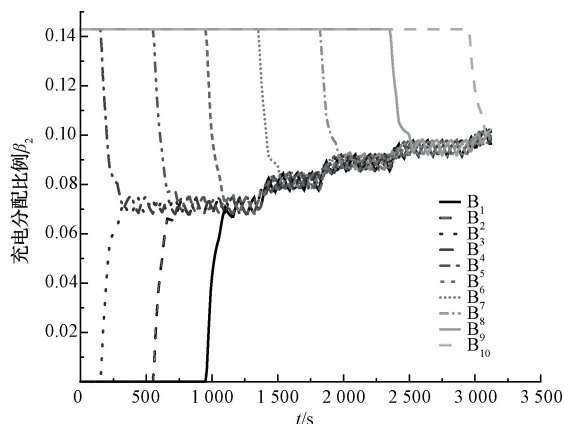


图15 充电状态传统求解方法

开关保持接入电池数量固定实现电池组端电压稳定。为进一步提高均衡性能,将单体电池的能量分配比例求解转化为非线性规划遗传优化算法进行求解。最后在MATLAB/Simulink中搭建10节电池串联的均衡仿真模型,结果表明本文所提方法电压波动较小,验证了本文方法拥有良好的稳压性能;与传统解最优能量分配比例方法相比,本文提出的求解方法在充电状态下均衡时间大约缩短了12.31%,放电状态下大约缩短了13.39%,具有更快的均衡速度。

参 考 文 献

- [1] 张宇,罗渝林,吴铁洲. 基于电感变换器的均衡方案[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(9): 170-175.
- [2] 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.
- [3] 邵亦博,吕玉祥,孙胜男,等. 锂离子电池荷电性能检测及健康状况分析[J]. 电测与仪表, 2019, 56(13): 113-116, 152.
- [4] E J Q, ZHANG B, ZENG Y, et al. Effects analysis on active equalization control of lithium-ion batteries based on intelligent estimation of the stat-of-charge[J]. Energy, 2022, 238: 121822.
- [5] 孙正,李军,李虎林. 考虑温度的电池荷电状态估算和主被动均衡[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(33): 14767-14778.
- [6] GUO X, WU Q, XING C, et al. An active equalization method for series-parallel battery pack based on an inductor[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 64: 1071.
- [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): 5294-5310.
- [8] 姚芳,王晓鹏,陈盛华,等. 基于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.
- [9] 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.
- [10] WU T Z, QI Y B, LIAO L, et al. Research on equalization strategy of lithium-ion batteries based on fuzzy logic control [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 40: 102722.
- [11] 孙金磊, 邹鑫, 崔凯, 等. 基于电池模组重构的均衡充电控制方法 [J]. 电源技术, 2022, 46(9): 1005-1008.
- [12] 魏业文, 解园琳, 李梅, 等. 改进的可重构均衡电路及控制策略研究 [J]. 电源技术, 2022, 46(4): 420-424.
- [13] HUANG W, QAHOUQ J A A. Energy sharing control scheme for state-of-charge balancing of distributed battery energy storage system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 2764-2776.
- [14] 廖力, 綦艺博, 纪锋. 基于可重构电池的稳压及均衡方法研究 [J]. 电源技术, 2021, 45(7): 897-901.
- [15] LI Y, YIN P, CHEN J. Active equalization of lithium-ion battery based on reconfigurable topology [J]. Applied Sciences, 2023, 13(2): 1154.
- [16] 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.
- [17] WANG Q, WANG C, LI X, et al. Cascade active balance charging of electric vehicle power battery based on model prediction control [J]. Energies, 2023, 16(5): 2287.
- [18] FRISON G, DIEHL M. HPIPM: A high-performance quadratic programming framework for model predictive control [J]. IFAC-Papers on Line, 2020, 53(2): 6563-6569.
- [19] YASINI T, ROSHANIAN J, TAGHAVIPOUR A. Improving the low orbit satellite tracking ability using nonlinear model predictive controller and Genetic Algorithm [J]. Advances in Space Research, 2023, 71(6): 2723-2732.

作者简介

廖力(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为电池管理系统、储能关键技术。

E-mail: Amazon2008@163.com

李勋波, 硕士研究生, 主要研究方向为电池管理系统。

E-mail: 1462562340@qq.com

杨达, 硕士研究生, 主要研究方向为电池管理系统。

E-mail: 3182114215@qq.com

姜久春, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电动汽车充电站、电动汽车电池管理系统、微网技术等。

E-mail: jcjiang@bjtu.edu.cn