

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190330

基于剩余电量估计的电池组充放电均衡策略

程俊¹, 曲妍², 李媛¹, 郎斌³, 肖先勇¹

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006;
3. 国网沈阳供电公司, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 为了实现充放电过程中各单体电池电量的均衡, 同时降低均衡过程中的损耗, 提出了一种基于剩余容量估计的电池组充放电均衡策略。不同于传统的基于 SOC 估计的均衡策略, 该策略以电池单体的剩余电量为均衡目标。将该策略与传统的均衡策略进行比较, 计算结果证明在一定的前提下, 所提出的策略能够减少均衡过程中转移的总电荷量, 从而降低损耗。分别采用所提出的均衡策略和基于 SOC 估计的均衡策略对三个串联的锂离子电池进行充放电的仿真, 结果证明所提出的策略不仅能够实现单体电池间的均衡, 而且能够降低损耗。

关键词: 电池; 剩余电量; 均衡策略; 转移电荷量; 损耗

Charge and discharge equalization strategy for battery packs based on remaining capacity estimation

CHENG Jun¹, QU Yan², LI Yuan¹, LANG Bin³, XIAO Xianyong¹

(1. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Grid Liaoning Electric Power Company Limited, Shenyang 110006, China; 3. State Grid Shenyang Power Supply Company, Shenyang 110006, China)

Abstract: In order to balance the capacity of battery cells in charging and discharging process and reduce the loss during equalization process, a charge and discharge equalization strategy for battery packs based on remaining capacity estimation is proposed. Different from traditional equalization strategies based on State Of Charge (SOC) estimation, this strategy uses the remaining capacity of battery cells as equilibrium target. Comparing this strategy with traditional equalization strategy, the calculation results show that under certain premise, the proposed strategy can reduce the total amount of charge transferred during the equilibrium process, thus reducing the loss. The charging and discharging simulations of three serially connected lithium-ion batteries using the proposed equalization strategy and the SOC estimation based equalization strategy have been carried out respectively. The results show that the proposed strategy can not only achieve balance among battery cells at the end of charge and discharge, but also reduce the energy loss.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707126) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGLNDK00DWJS1800020).

Key words: battery; remaining capacity; equalization strategy; transferred charge; energy loss

0 引言

与其他的可充电电池相比, 锂离子电池具有较高的功率密度和能量密度, 被广泛应用于电动汽车和智能电网储能系统^[1-5]。由于单个锂离子电池的容量小、电压低, 因此通常将若干个电池串并联组成高电压、大容量的电池组。例如, 特斯拉电动汽车的电池组使用了数千节 18650 锂离子电池。

由于材料和制作工艺的不一致, 同一批次的电池也会在容量、老化特性和性能特性等方面表现出差异^[6-9], 因此, 串联电池组中各单体电池的荷电状态和容量会出现不均衡的现象, 并且不均衡程度会随着充放电循环次数的增加而加重。在充放电过程中, 单体电池间的不均衡会使某些单体电池过充电或过放电, 导致电池容量降低, 使用寿命缩短, 甚至直接损坏电池, 还可能引发爆炸^[10-11]。因此, 提出一种有效的均衡方法减小或消除电池使用过程中的不均衡, 最大限度地发挥各单体电池的性能, 对于电池储能系统有极其重要的意义^[12-14]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51707126); 国家电网科技项目资助(SGLNDK00DWJS1800020)

目前, 国内外学者所提出的均衡方法主要分为两类: 被动均衡和主动均衡。被动均衡^[15]通过给每个单体电池并联一个开关电阻进行分流。该方法原理简单、易于实现, 但均衡电流较小, 且有部分能量消耗在电阻上, 因此均衡效率较低, 并且需要配备散热装置。主动均衡以电感、电容或反激式变压器等储能元件为载体, 从电量高的电池向电量低的电池转移电能。该方法提高了均衡效率和能量利用率。但是, 均衡能量在转移的过程中也会产生一定的损耗, 并且该损耗与所选择的均衡策略和均衡电路密切相关。

文献[16-20]提出了几种不同的主动均衡方法。文献[16]使用电容作为储能元件, 通过开关矩阵的作用, 将电能从电压高的电池转移到电压低的电池, 该方法能够实现电压均衡, 但是当两电池电压相差较小时, 每个均衡周期转移的电量很少, 因此需要较长的时间才能实现均衡。文献[17]使用反激变压器作为储能元件, 该方法每个均衡周期转移的电量基本相同, 且多组电池对间的电量转移能够同时进行, 因此能够在较短时间内实现均衡, 但使用的功率开关较多、控制复杂。文献[18-20]使用电感作为储能元件, 这些方法能够缩短均衡时间, 提高均衡效率。但是, 已有的研究主要集中在通过改进电路拓扑来减小均衡过程中的损耗, 几乎没有通过改进均衡策略来减小损耗的研究。

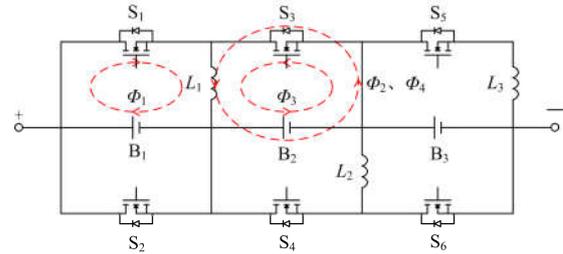
本文所提出的均衡策略以单体电池的剩余电量为均衡目标, 不仅能够减少均衡过程中单体电池间转移的电荷量, 而且能够保证所有的单体电池同时充满或放空, 因而不会出现过充电和过放电的情况。因为减少了转移的电荷量, 该策略能够降低均衡过程中的损耗, 提高均衡效率。分别采用本文所提出的均衡策略和基于 SOC 估计的均衡策略对三个串联的锂离子电池进行充放电仿真, 结果表明该策略不仅能够实现单体电池间的均衡, 而且显著地降低了均衡过程中的损耗, 提高了均衡效率。

1 均衡电路工作原理分析

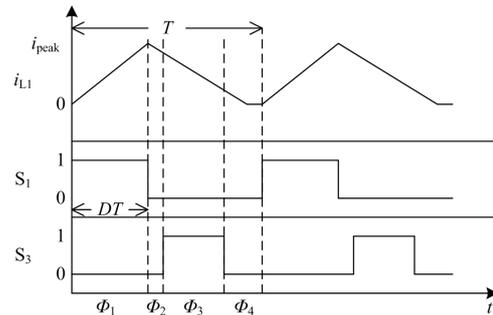
本文采用一种基于电感储能的均衡电路^[21], 图 1(a)为该均衡电路的基本结构, 每个均衡模块由两个 MOSFET 和一个电感组成。需要注意的是, 由于寄生二极管的存在, MOSTET 在关断时只能阻断一个方向上的电流。

通过控制 MOSFET, 可以利用储能电感实现单体电池间的电量转移。如图 1(a), 当开关 S_1 和 S_3 由图 1(b)中一组不重叠的 PWM 信号控制, 而其他的开关均关断时, 可以将单体电池 B_1 的电量向单体

电池 B_2 转移。每个周期可以分成四个区间 Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 和 Φ_4 。



(a) 均衡电路拓扑



(b) 控制信号及对应的电感电流

图 1 均衡电路拓扑及其工作原理

Fig. 1 Topology and working principle of balancing circuit

在区间 Φ_1 内, 开关 S_1 导通, 单体电池 B_1 给电感 L_1 充电, 假设电路中的电感值均为 L , 电池端电压为 V_B , 忽略开关的通态电阻和电感的直流内阻, 根据基尔霍夫电压定律可得电感电流为

$$i_L = \frac{V_B}{L} t (0 \leq t \leq DT) \quad (1)$$

因此, 一个周期内转移的电荷量为

$$q = \int_0^{DT} \frac{V_B}{L} t dt = \frac{V_B D^2 T^2}{2L} \quad (2)$$

根据式(1)和式(2), 综合考虑电感值、电池端电压和均衡周期, 可以确定合适的占空比 D 来最大限度地发挥电感的性能。

在区间 Φ_2 内, 开关 S_1 断开, 单体电池 B_1 停止给电感 L_1 充电。区间 Φ_2 的长度应该大于开关由导通到关断和由关断到导通所需的时间。如果没有区间 Φ_2 , 可能会出现开关 S_1 和 S_3 同时导通的情况, 这时电池 B_1 和 B_2 会短路。同时, 在区间 Φ_2 内, 必须要有回路让电感 L_1 放电, 否则电感 L_1 的电压会急剧增大而损坏元件。

在区间 Φ_3 内, 开关 S_3 闭合, 电感 L_1 释放能量给单体电池 B_2 充电。闭合开关 S_3 的目的是使电流流经 S_3 而不流经二极管, 减小损耗。

在区间 Φ_4 内, 开关 S_4 断开, 电感电流流经二

极管给单体电池 B_2 充电。该区间既能够确保电感 L_1 储存的能量完全释放, 又能够防止单体电池 B_2 给电感 L_1 充电。

2 均衡策略

2.1 串联电池组不均衡问题分析

串联电池组会因为各个单体电池间的差异而出现不均衡的情况。但是, 只有当有单体电池完全充满或完全放空时, 电池组才会受到影响。

如图 2(a)所示, 当串联电池组中某个电池的电量完全放空而其他电池还有电量时, 整个电池组不能继续放电, 否则会损害电池的健康状态, 因此无法充分利用电池组的容量。如图 2(b)所示, 当串联电池组中某个电池的电量完全充满而其他电池还没有充满时, 整个电池组不能继续充电。但是如图 2(c)所示, 当串联电池组中不存在完全充满或完全放空的电池时, 即使存在不均衡的情况, 电池组仍然能够正常充放电。

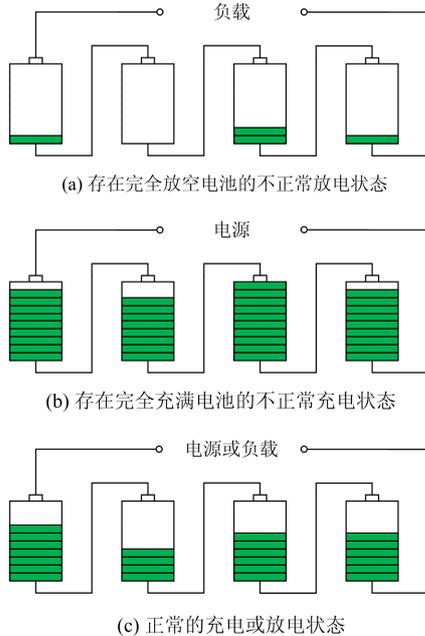


图 2 串联电池组的工作状态分析

Fig. 2 Operating state analysis of a serially connected battery pack

因此, 没有必要时刻保持电池间电量的均衡, 只要保证所有的电池同时充满或同时放空, 即可既不损害电池的健康状态, 又充分利用电池组的容量。

2.2 均衡过程中的损耗分析

一个均衡模块的能量损耗可以表示为

$$E_{\text{loss}} = \int_0^t v_b i_b (1 - \eta) dt \quad (3)$$

式中: v_b 和 i_b 分别表示电池电压和均衡电流; η 为均衡模块的效率。

由于各个单体电池间的电压差异较小, 因此, 式(3)可以近似表示为

$$E_{\text{loss}} \approx V_B (1 - \eta) \int_0^t i_b dt = V_B (1 - \eta) Q_{\text{tr}} \quad (4)$$

式中: V_B 是单体电池的平均电压; Q_{tr} 是均衡过程中转移的总电荷量。

由式(4)可知, 均衡过程中的损耗不仅与均衡模块的效率有关, 而且与转移的总电荷量有关。因此, 可以通过减少均衡过程中转移的总电荷量来降低损耗。

2.3 基于剩余电量估计的均衡策略

传统的均衡策略都是选用电压或荷电状态作为参考, 它们的均衡目标是先尽快地消除各单体电池间电压或荷电状态的差异, 然后保持各单体电池的电压或荷电状态相同。这两种方法都能够较快地实现单体电池间的均衡, 并一直保持在均衡状态下, 但是从实际应用的角度来看, 一直维持在均衡状态并不是必要的, 只要不出现如图 2(a)和图 2(b)的不正常工作状态, 电池组就可以正常工作。

基于以上分析, 本文提出了基于剩余电量估计的均衡策略, 该策略以单体电池的剩余电量为均衡目标。该策略不仅能够保证所有的单体电池同时充满或同时放空, 实现均衡, 而且能够减少均衡过程中转移的电荷量, 从而减小损耗。

假设单体电池 i 的最大容量为 $C_{i\text{max}}$, 最小容量为 $C_{i\text{min}}$, 初始电量为 C_{i0} 。则在充电状态下, 剩余电量可以表示为

$$C_{ir} = C_{i\text{max}} - C_{i0} \quad (5)$$

在放电状态下, 剩余电量可以表示为

$$C_{ir} = C_{i0} - C_{i\text{min}} \quad (6)$$

2.4 基于剩余电量估计的均衡策略与基于 SOC 估计的均衡策略的比较

以两个单体电池串联组成的电池组为例, 分析采用两种均衡策略工作于充电状态下的电荷转移情况。假设两个单体电池的最大容量分别为 $C_{1\text{max}}$ 、 $C_{2\text{max}}$, 初始容量分别为 C_{10} 、 C_{20} , 初始荷电状态分别为 SOC_{10} 、 SOC_{20} 。

图 3 为采用基于 SOC 估计的均衡策略工作于充电状态下的相关曲线。图 3(a)和图 3(b)分别为各单体电池电量和荷电状态的曲线, 图 3(c)为各单体电池剩余电量的曲线, 图 3(d)为均衡电流的曲线, 取单体电池 2 到单体电池 1 的方向为正方向。从图 3(b)可以看出, 从 t_1 开始, 两个单体电池的荷电状态实

现均衡, 并一直保持到充电结束。两个单体电池在 t_1 时的荷电状态可以表示为

$$SOC(t_1) = \frac{C_{10}}{C_{1\max}} + \frac{Q_{\text{ch},t_1} - Q_{\text{tr},t_1}}{C_{1\max}} = \frac{C_{20}}{C_{2\max}} + \frac{Q_{\text{ch},t_1} - Q_{\text{tr},t_1}}{C_{2\max}} \quad (7)$$

式中: Q_{ch,t_1} 是来自于充电电路的电荷量; Q_{tr,t_1} 是两单体电池间转移的电荷量, 若 Q_{tr,t_1} 为正, 则表示单体电池 2 向单体电池 1 转移电荷, 反之, 则表示单体电池 1 向单体电池 2 转移电荷。

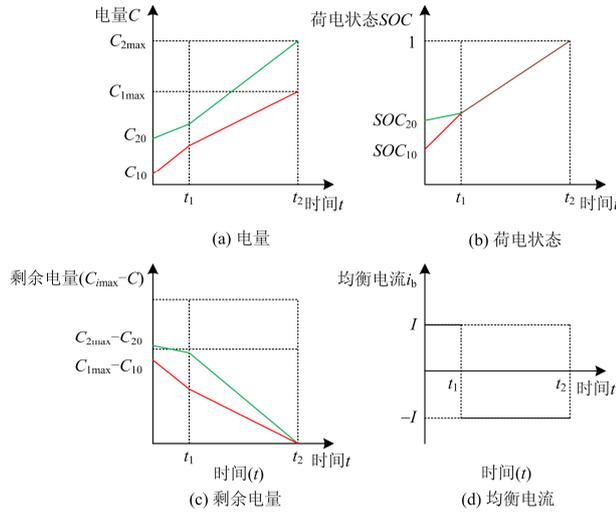


图 3 采用基于 SOC 估计的均衡策略工作于充电状态下的相关曲线

Fig. 3 Correlation curves when equilibrium strategy based on SOC estimation adopted working on charging state

因此, $0 \sim t_1$ 内两单体电池间转移的电荷量为

$$Q_{\text{tr},t_1} = |(SOC_{\text{ch}2} + SOC_{20}) - (SOC_{\text{ch}1} + SOC_{10})| \times \frac{C_{1\max} C_{2\max}}{C_{1\max} + C_{2\max}} \quad (8)$$

式中, $SOC_{\text{ch}1}$ 和 $SOC_{\text{ch}2}$ 为充电电流作用下两单体电池荷电状态的增加量。

由式(8)可知, Q_{tr,t_1} 的符号与 $SOC_{20} - SOC_{10}$ 的符号相同。

在 $t_1 \sim t_2$ 期间, 两个单体电池的荷电状态相同, 该期间两单体电池间转移的电荷量为

$$Q_{\text{tr},t_2} = \left| \frac{Q_{\text{ch},t_2} (C_{1\max} - C_{2\max})}{C_{1\max} + C_{2\max}} \right| \quad (9)$$

由式(9)可知, Q_{tr,t_2} 的符号与 $C_{1\max} - C_{2\max}$ 的符号相同。

因此, 整个充电过程中, 两单体电池间转移的

总电荷量为

$$Q_{\text{tr},\text{sum}} = Q_{\text{tr},t_1} + Q_{\text{tr},t_2} \geq \left| \frac{(C_{1\max} - C_{10}) - (C_{2\max} - C_{20})}{2} \right| \quad (10)$$

当且仅当 Q_{tr,t_1} 和 Q_{tr,t_2} 的符号相同, 即满足式(11)时, 不等式取等号。

$$(SOC_{20} - SOC_{10})(C_{1\max} - C_{2\max}) \geq 0 \quad (11)$$

图 4 为采用基于剩余电量估计的均衡策略工作于充电状态下的相关曲线, 与图 3 对应。从图 4(c) 可以看出, 从 t_1 开始, 两个单体电池的剩余电量实现均衡, 并一直保持到充电结束。

$0 \sim t_1$ 内, 两单体电池间转移的电荷量为

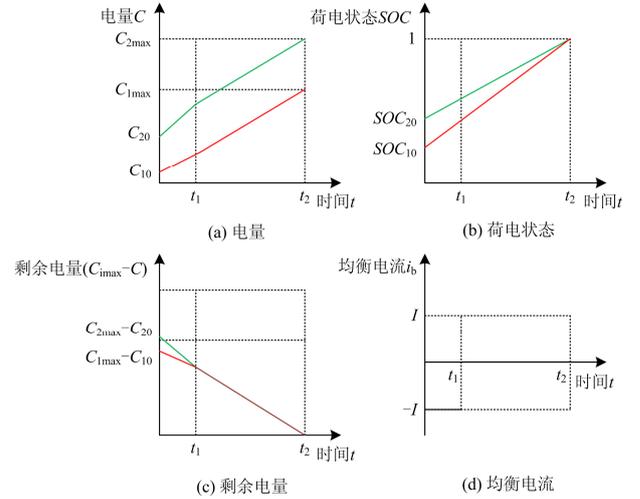


图 4 采用基于剩余电量估计的均衡策略工作于充电状态下的相关曲线

Fig. 4 Correlation curves when equilibrium strategy based on remaining capacity estimation adopted working on charging state

$$Q_{\text{tr},t_1} = \left| \frac{(C_{2\max} - C_{20}) - (C_{1\max} - C_{10})}{2} \right| \quad (12)$$

$t_1 \sim t_2$ 期间, 两单体电池的剩余电量保持相等, 两单体电池间无电荷转移。因此, 整个充电过程中, 两单体电池间转移的总电荷量为

$$Q_{\text{tr}2,\text{sum}} = \left| \frac{(C_{2\max} - C_{20}) - (C_{1\max} - C_{10})}{2} \right| \quad (13)$$

比较式(10)和式(13)可知, 采用本文所提出的均衡策略时, 两单体电池间转移的总电荷量始终小于等于采用基于 SOC 估计的均衡策略时转移的总电荷量。由图 3(d)可知, 采用基于 SOC 估计的均衡策略时, 存在电荷在两个单体电池间来回转移的情况, 这增加了转移的总电荷量。

因此, 由式(10)、式(11)和式(13)可知, 当某个单体电池既有较大的最大容量, 又有较大的初始荷电状态时, 本文提出的均衡策略能够减少均衡过程中转移的总电荷量, 降低损耗。

3 均衡仿真

3.1 均衡控制

为了将本文所提出的均衡策略应用于实际的均衡电路中, 提出了对应的均衡控制算法。该算法可以根据各个单体电池的剩余电量来确定进行电荷转移的电池对。具体地说, 充电状态下的均衡算法可以总结如下。

输入: 各单体电池的剩余电量矩阵 C , 均衡周期 T

输出: 进行电荷转移的电池对

- 1: while $\text{Var}(C)/\text{avg}(C) > 0.01$ do
- 2: $d = \arg \max C^{(j)} j \in v$
- 3: $\bar{C}_{\text{front}} = \frac{1}{\sigma-1} \sum_{j=1}^{\sigma-1} C^{(j)}$
- 4: $\bar{C}_{\text{back}} = \frac{1}{N-\sigma-1} \sum_{j=1}^{\sigma-1} C^{(j)}$
- 5: $\text{dir} = \text{signum}(\bar{C}_{\text{front}} - \bar{C}_{\text{back}})$
- 6: $s = d + 1$
- 7: 从单体电池 s 向 d 转移电荷, 持续一个均衡周期
- 8: 更新各单体电池的剩余电量矩阵
- 9: end while

该均衡算法的目标是使得各单体电池剩余电量的差异低于预先设置的阈值(第 1 行)。均衡算法的关键是要确定进行电荷转移的电池对, 即输出电荷的单体电池 s 和输入电荷的单体电池 d 。该算法首先选择剩余电量最大的单体电池作为输入电荷的单体电池 d , 然后根据此单体电池两侧单体电池剩余电量的平均值确定电荷的转移方向, 从而确定输出电荷的单体电池 s (第 2~6 行)。最后, 在更新各单体电池的剩余电量矩阵之前, 均衡电路会根据确定好的电池对进行持续一个均衡周期的电荷转移(第 7~8 行)。该过程会一直重复直到 $\text{Var}(C)/\text{avg}(C)$ 充分小, 这时认为各单体电池的剩余电量实现了均衡, 即所有的单体电池可以同时充满。

图 5 为均衡控制的流程图。控制器采集单体电池的电压、电流和温度来估计其当前容量、最大容量和最小容量。然后, 控制器根据各个单体电池的剩余电量来确定进行电荷转移的电池对。每个均衡周期结束后, 控制器都会重新采集数据进行计算, 并不断循环, 直到所有单体电池的剩余电量实现均衡为止。

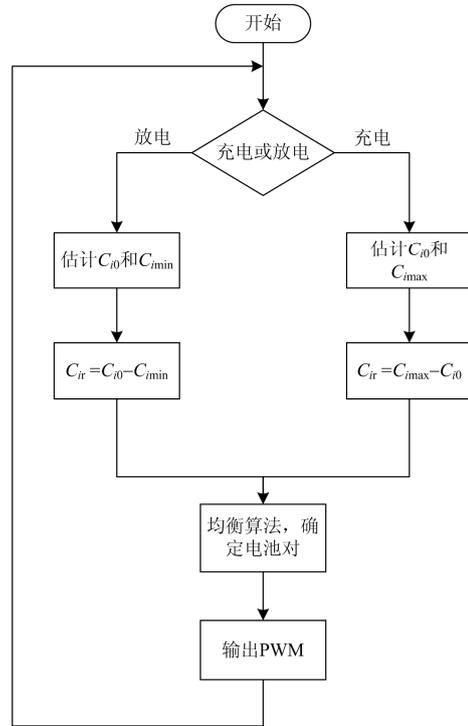


图 5 均衡控制流程图

Fig. 5 Flowchart of balance control

3.2 电池容量估计

本文提出的均衡策略需要用到电池的容量, 获取电池容量最准确可靠的方法就是进行核容测试, 即以合适的电流给充满的电池放电, 直到电池的端电压下降到截止电压, 整个过程中电池放出的电量即为电池的容量。但是, 该方法只能离线测量, 且费时费力。

文献[22]提出了一种在线的电池容量估计方法, 该方法利用两个时刻的荷电状态以及该段时间内转移的电荷量计算得出电池的容量, 计算式为

$$C_{\text{imax}} = \frac{C_i(t_2) - C_i(t_1)}{\text{SOC}_i(t_2) - \text{SOC}_i(t_1)} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} i_B(t) dt}{\text{SOC}_i(t_2) - \text{SOC}_i(t_1)} \quad (14)$$

式中: $\text{SOC}_i(t_1)$ 和 $\text{SOC}_i(t_2)$ 分别为单体电池 i 在 t_1 和 t_2 时刻的荷电状态; $C_i(t_1)$ 和 $C_i(t_2)$ 分别为单体电池 i 在 t_1 和 t_2 时刻的电量; i_B 为流过单体电池的电流。电池充电时, i_B 为正, 放电时为负。

根据式(14), 若已知两个不同时刻的荷电状态以及该段时间内转移的电荷量, 就可以计算出电池的最大容量。目前, 在线 SOC 估计的方法有安时积分法^[23]、人工神经网络法^[24]和卡尔曼滤波法^[25]

等。因为 SOC 估计不是本文的研究重点, 此处不再赘述。

因此, 单体电池 i 的初始电量和最小容量可以分别表示为

$$\begin{cases} C_{i0} = SOC_{i0} \cdot C_{imax} \\ C_{imin} = SOC_{imin} \cdot C_{imax} \end{cases} \quad (15)$$

式中: SOC_{i0} 为电池单体 i 的初始荷电状态; SOC_{imin} 为电池达到放电截止电压时对应的荷电状态。

3.3 充电均衡仿真

采用 1 A 的恒流源对由三个单体电池串联组成的电池组进行充电, 当电池组的 SOC 达到 100% 时停止充电。三个单体电池的标称电压均为 3.7 V, 最大容量分别为 0.108 Ah、0.121 Ah 和 0.135 Ah, 初始 SOC 分别为 38%、21% 和 30%。

图 6 为采用基于 SOC 估计的均衡策略和采用基于剩余电量估计的均衡策略的充电均衡仿真结果。从图 6 中可以看出, 两种策略均可实现充电均衡, 传统的基于 SOC 估计的均衡策略大约在第 75 s 实现均衡, 基于剩余电量估计的均衡策略在第 325 s, 充电结束时实现均衡。

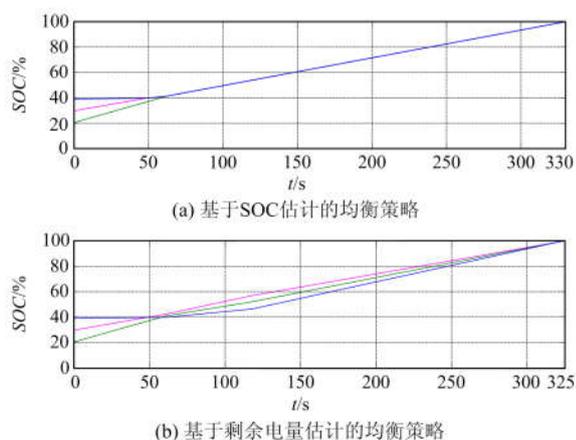


图 6 充电过程中的 SOC 曲线
Fig. 6 SOC curves during charging

表 1 为两种策略均衡过程中转移的电荷量和损耗。由表 1 中数据可知, 与基于 SOC 估计的均衡策略相比, 本文提出的均衡策略在均衡过程中转移的总电荷量减少了 23.37%, 损耗减少了 25.25%。

表 1 两种均衡策略充电过程中转移电荷量和损耗的对比
Table 1 Comparison of transferred charge and energy loss for two equalization strategies during charging

策略	转移电荷量/C	损耗/J
基于 SOC 估计的均衡策略	197.032	161.557
基于剩余电量估计的均衡策略	150.99	120.768

3.4 放电均衡仿真

由三个单体电池串联组成的电池组以 1 A 的电流进行恒流放电, 当电池组的 SOC 达到 10% 时停止放电。三个单体电池的标称电压均为 3.7 V, 最大容量分别为 0.108 Ah、0.121 Ah 和 0.135 Ah, 初始 SOC 分别为 90%、74% 和 82%。

图 7 为采用基于 SOC 估计的均衡策略和采用基于剩余电量估计的均衡策略的放电均衡实验结果。可以看出, 两种策略均可以实现放电均衡, 传统的基于 SOC 估计的均衡策略大约在第 70 s 实现均衡, 基于剩余电量估计的均衡策略在第 305 s, 放电结束时实现均衡。

表 2 为两种策略均衡过程中转移的电荷量和损耗。由表 2 中数据可知, 与基于 SOC 估计的均衡策略相比, 本文提出的均衡策略在均衡过程中转移的电荷量减少了 56.92%, 损耗减少了 56.44%。

表 2 两种均衡策略放电过程中转移电荷量和损耗的对比
Table 2 Comparison of transferred charge and energy loss for two equalization strategies during discharging

策略	转移电荷量/C	损耗/J
基于 SOC 估计的均衡策略	176.602	90.320
基于剩余电量估计的均衡策略	76.077	39.340

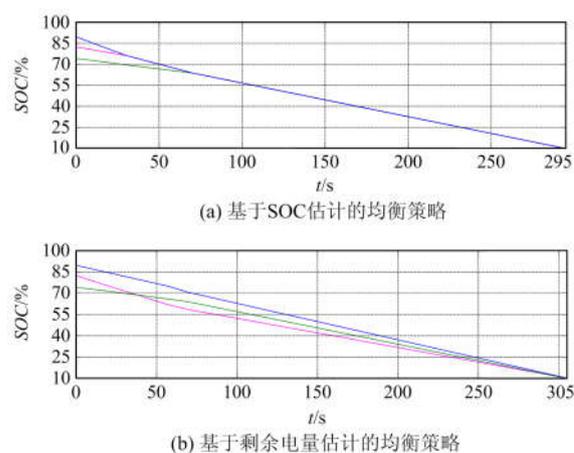


图 7 放电过程中的 SOC 曲线
Fig. 7 SOC curves during discharging

4 结论

本文提出了一种基于剩余电量估计的均衡策略, 以单体电池的剩余电量为均衡目标, 能够减少均衡过程中转移的电荷量, 从而降低损耗。与传统的基于 SOC 估计的均衡策略相比, 该策略无法实现实时的均衡, 但是它能够保证所有的单体电池同时充满或同时放空, 达到的效果是相同的。另外, 该策略减少了转移的电荷量, 降低了损耗。该策略主

要适用于单体电池最大容量存在差异的大规模电池组。仿真结果证明了所提出均衡策略的有效性。

参考文献

- [1] BARONTI F, BERNARDESCHI C, CASSANO L, et al. Design and safety verification of a distributed charge equalizer for modular li-ion batteries[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 1003-1011.
- [2] RANJBAR A H, BANAEI A, KHOOBROO A, et al. Online estimation of state of charge in li-ion batteries using impulse response concept[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 360-367.
- [3] MESBAHI T, RIZOUG N, BARTHOLOMEÜS P, et al. Optimal energy management for a li-ion battery/supercapacitor hybrid energy storage system based on a particle swarm optimization incorporating nelder-mead simplex approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2017, 2(2): 99-110.
- [4] 严俊, 严凤. 基于两步规划的电动汽车充换电服务设施选址方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 48-56.
YAN Jun, YAN Feng. Location method of charging and swapping service facilities based on a two-step planning[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 48-56.
- [5] ZHENG C, LI W, LIANG Q. An energy management strategy of hybrid energy storage systems for electric vehicle applications[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1880-1888.
- [6] KIM H S K G. On dynamic reconfiguration of a large-scale battery system[C] // 2009 15th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, April 13-16, 2009, San Francisco, CA, USA: 87-96.
- [7] CHEN Y, LIU X, CUI Y, et al. A multi-winding transformer cell-to-cell active equalization method for lithium-ion batteries with reduced number of driving circuits[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 4916-4929.
- [8] HANNAN M A, HOQUE M M, PENG S E, et al. Lithium-ion battery charge equalization algorithm for electric vehicle applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2541-2549.
- [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, 65(8): 6762-6771.
- [10] MUHAMMAD S, GUAN N, LI S, et al. Efficient and balanced charging of reconfigurable battery with variable power supply[C] // 2017 IEEE 23rd International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA), August 16-18, 2017, Hsinchu, Taiwan, China: 1-6.
- [11] CI S, ZHANG J, SHARIF H, et al. A novel design of adaptive reconfigurable multicell battery for power-aware embedded networked sensing systems[C] // IEEE Global Telecommunications Conference, November 26-30, 2007, Washington, DC, USA: 1043-1047.
- [12] GUNLU G. Dynamically reconfigurable independent cellular switching circuits for managing battery modules[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 194-201.
- [13] CI S, LIN N, WU D. Reconfigurable battery techniques and systems: a survey[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1175-1189.
- [14] 冯飞, 宋凯, 逯仁贵, 等. 磷酸铁锂电池组均衡控制策略及荷电状态估计算法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 22-29.
FENG Fei, SONG Kai, LU Rengui, et al. Equalization control strategy and SOC estimation for LiFePO₄ battery pack[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 22-29.
- [15] 徐顺刚, 王金平, 许建平. 一种延长电动汽车蓄电池寿命的均衡充电控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(3): 43-48, 17.
XU Shungang, WANG Jinping, XU Jianping. An equalizing charge control strategy to extend battery cycle life for electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(3): 43-48, 17.
- [16] LU R, ZHU C, TIAN L, et al. Super-capacitor stacks management system with dynamic equalization techniques[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 254-258.
- [17] NARAYANASWAMY S, KAUER M, STEINHORST 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] 吕航, 刘承志, 尹栋, 等. 深海动力磷酸铁锂电池组均衡方案设计优化[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 232-239.
LÜ Hang, LIU Chengzhi, YIN Dong, et al. The design and optimize of equalization schemes for underwater power LiFePO₄ battery stack[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 232-239.
- [19] 张寅孩, 林俊, 黎继刚. 基于储能电感对称分布的动

- 态均衡充电的研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 136-141.
- ZHANG Yinhai, LIN Jun, LI Jigang. Dynamic charge equalization with inductor symmetrically distributed[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 136-141.
- [20] KAUER M, NARAYANASWAMY S, STEINHORST S, et al. Many-to-many active cell balancing strategy design[C] // The 20th Asia and South Pacific Design Automation Conference, January 19-22, 2015, Chiba, Japan: 267-272.
- [21] LUKASIEWYCZ M, STEINHORST S, NARAYANASWAMY S. Verification of balancing architectures for modular batteries[C] // 2014 International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS), October 12-17, 2014, New Delhi, India: 1-10.
- [22] EINHORN M, CONTE F V, KRAL C, et al. A method for online capacity estimation of lithium ion battery cells using the state of charge and the transferred charge[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(2): 736-741.
- [23] 于海芳, 逯仁贵, 朱春波, 等. 基于安时法的镍氢电池 SOC 估计误差校正[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 12-18.
- YU Haifang, LU Rengui, ZHU Chunbo, et al. State of charge estimation calibration for Ni-MH battery based on ampere-hour method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 12-18.
- [24] 雷肖, 陈清泉, 刘开培, 等. 电动车蓄电池荷电状态估计的神经网络方法[J]. 电工技术报, 2007, 22(8): 155-160.
- LEI Xiao, CHEN Qingquan, LIU Kaipei, et al. Battery state of charge estimation based on neural-network for electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(8): 155-160.
- [25] 刘湘东, 刘承志, 杨梓杰, 等. 基于无迹卡尔曼滤波的全钒液流电池状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1769-1777, 1914.
- LIU Xiangdong, LIU Chengzhi, YANG Zijie, et al. States estimation of vanadium redox flow battery based on unscented Kalman filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1769-1777, 1914.

收稿日期: 2019-03-25; 修回日期: 2019-06-01

作者简介:

程 俊(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为光伏发电并网技术、电池管理系统; E-mail: 574111026@qq.com

曲 妍(1981—), 女, 本科, 研究方向为高压开关及变电二次专业技术; E-mail: 8290637@qq.com

李 媛(1980—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为可再生能源发电技术、分布式电源接入。E-mail: yli@scu.edu.cn

(编辑 许 威)