

基于双阈值的高精度锂电池 主被动均衡策略

单恩泽,王鹿军

(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,
湖北 武汉 430068)

摘要:针对锂离子电池充放电过程中电量表征变化幅度大、精度低的问题,提出了一种通过实时分段进行双阈值控制的主被动均衡控制策略。该策略结合锂离子电池开路电压与荷电状态(SOC)的关系曲线,实时分段并合理调整均衡控制方向。通过双阈值的精确调控,提高充放电精度;利用主被动均衡电路中的被动均衡小电流特点,增加单体电池在充放电末期的反应时间,实现准确和安全的电池充放电目的。实验结果表明,锂离子电池组充放电过程中进行分段双阈值主被动均衡控制,可以在电池组充放电速度不变的情况下,提高约2%的充电精度,充电末期稳定减缓电流和电压,证明了控制方法的可行性。

关键词:锂离子电池;电量表征;实时分段;双阈值;主被动均衡

中图分类号:TM912.9 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed21197

Active and Passive Equalization Strategy of Lithium Battery Based on High Precision Double Threshold Control

SHAN Enze, WANG Lujun

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

Abstract: In order to solve the problems of large variation range and low accuracy in charge and discharge process of lithium-ion battery, an active and passive equalization control strategy was proposed by using real-time segmented dual threshold control. The strategy combined the relationship curve between open circuit voltage and state of charge (SOC) of Li-ion battery, and adjusted the equalization control direction in real time. Through the precise control of double threshold, the accuracy of charge and discharge was improved. By using the characteristics of passive balance small current in active and passive balance circuit, the reaction time of single battery at the end of charge and discharge was increased, so as to achieve the accurate and safe purpose of battery charge and discharge. The experimental results show that the double threshold active and passive equalization control can improve the charging accuracy by about 2% when the charging and discharging speed of the lithium-ion battery is constant, and slow down the current and voltage stably at the end of charging, which proves the feasibility of the control method.

Key words: lithium-ion battery; electricity characterization; real-time segmentation; double threshold; active and passive equilibrium

电动汽车中使用的锂离子电池,因其能量密度高、自放电率小、工作电压高、寿命长等优点被广泛应用^[1]。为满足不同电压与功率的需求,锂离子电池常采用串并联的方式^[2],进而暴露出不

同工况下各单体电池不一致性的问题,且若干次循环充放电后这一现象会加剧^[3]。为提高能量利用率,减小不一致性对电池寿命和可用容量的影响,电池均衡尤为重要^[4]。

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51607060)

作者简介:单恩泽(1995—),男,硕士研究生,Email:semswb@126.com

目前,对于电池均衡的主要研究包括均衡系统控制策略和均衡拓扑结构设计2个方面,但与均衡拓扑结构相比,对均衡策略的研究较少^[5]。在均衡策略中,判断电池是否需要均衡的依据一般是电压或者荷电状态(*SOC*),电池电压相对容易获得,但受工作条件等因素影响较大,难以提供准确的参数用于均衡系统^[6]。*SOC*均衡控制策略受电池工作状态的影响较小,但其均衡性能与*SOC*估计的精度有关^[7]。文献[8]中用电压作为均衡判据,从部分实验数据对比可知,在锂离子电池处于平台期(即*SOC*为20%~80%)时,*SOC*随着电压的变化幅度不明显,导致更多次的均衡电路启动与关闭,这在一定程度上加大了器件的损耗并且影响了电池组的充放电速度。因此,某些存在电压平台期的电池并不适合选用电压作为判据^[9]。文献[10]用*SOC*作为均衡判据,采用库仑计数法,其中涉及到多个测量数据的实时准确性,如果电流测量出现偏差,将会导致*SOC*值漂移,这种叠加误差会随着时间的推移而累积。文献[11]所用到的锂离子电池,当*SOC*在[0, 0.2]或者[0.8, 1]内时,开路电压(*OCV*)与荷电状态(*SOC*)之间的关系曲线陡峭,其后果是极小的*SOC*差值误差也会导致多个单体电池的电压相差较大,从而对整个电池组造成影响^[12]。因此,为了获得准确的电池*SOC*,通常需要使用复杂的算法来估计电池组中每个电池的*SOC*,这使得*SOC*均衡控制方案存在计算量大、复杂度高等缺点^[13]。

基于对上述两种普遍均衡控制策略的优缺点分析,本文提出了一种双阈值混合均衡控制策略。首先,此方法是基于锂离子电池固有的开路电压与荷电状态(*OCV-SOC*)特性,结合实时分段的思想,将一个单体电池的充放电过程进行细化,从而提高其充放电的精确度。其次,将电压和*SOC*进行整合分析后作为均衡判据,既避免了*SOC*均衡控制策略计算量大、电压均衡控制策略性能差的缺点,又提高了充放电的效率。最后,将此均衡策略与混合均衡电路相结合,通过仿真实验证明了其可行性。

1 混合均衡电路及其工作原理

1.1 均衡电路

文献[14]提出一种基于LC振荡的均衡电路,通过提高单体电池间的电压差来提高均衡速率。

将此电路与被动均衡电路结合,可弥补由于被动均衡加入使得整体均衡时间变长的缺陷。通过硬件电路上的适当修改,将主被动均衡结合起来,达到在不同的情况下使用不同均衡方式的目的,混合均衡拓扑结构如图1所示。

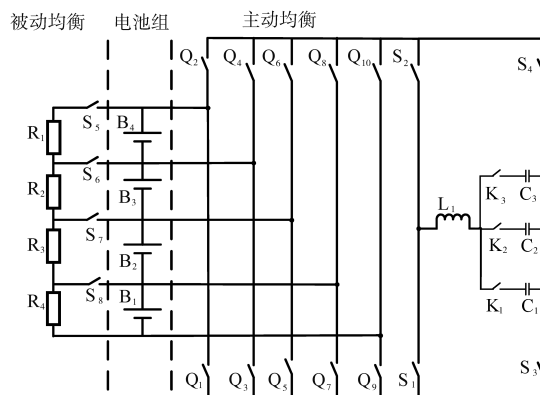


图1 混合均衡整体结构

Fig.1 Mixed equilibrium overall structure

由图1可知,整个结构包括3个部分:被动均衡、电池组和主动均衡。被动均衡电路中电阻上的分流电流必须远大于锂动力电池的自放电流,才能达到均衡充电的效果^[15-16]。主动均衡电路选择多支路LC振荡电路,包括由*N*个单体电池串联而成的电池组、开关矩阵和含有多条不同容量LC支路的H桥式谐振均衡器。

该混合均衡电路的优点在于:

- 1) H桥式电路定期切换流过电容电流的方向,提高了均衡电压电流幅值;
- 2) 对LC支路的选择可以满足不同条件下对均衡效率和功率的需求,实现均衡电流效率可控的分段式均衡;
- 3) 该主动均衡电路不仅可以进行单体电池间的均衡,而且可以一对多,多对一的均衡;
- 4) 主、被动均衡电路相互切换简单,都单独作用于电池组,互不干扰。

1.2 工作原理分析

当电池组中的部分单体电池电压或者荷电状态达到均衡条件时,激活混合均衡电路的工作状态。工作状态分成2个部分:主动均衡参与的电池组放电过程和前半部分充电过程、被动均衡参与的充电过程末期。以1个充放电循环为例,当电池组放电时,可以启动主动均衡,一方面减少电池组均衡时的能量损耗,将最多的电能输出到负载端;另一方面,主动均衡的均衡电流较大,可以在相对短的时间内对即将欠压的电池进行

补电,尽可能增加续航能力,此时被动均衡关闭。电池组放电至欠压,主动均衡过程结束^[17]。单独以电容为储能元件的均衡方案,由于单体电池间电压差值小,再加上开关管的导通压降,能量转移能力差,甚至无法转移,并且要求开关管是双向可控导通的器件^[18],所以本文选择LC振荡电路进行分析。

以下举例分析单体电池间的均衡。假设电池组中的 B_1 电量最高,与之均衡的是 B_2 ,选择 L_1 , C_1 支路,如图2所示。

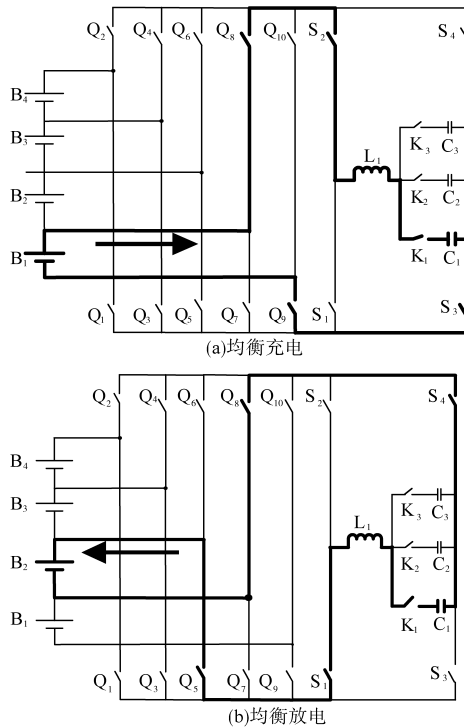


图2 主动均衡工作过程

Fig.2 Active equalization process

在主动均衡的1个周期中,首先,电池 B_1 放电并将电能储存在电容 C_1 中,接着电容 C_1 给电池 B_2 充电,实现电能转移。关键在于后续利用桥式电路的一次换向,使电池 B_1 充电方向与电容的放电方向一致,提高下一周期均衡电压和电流。最后,电容回归初始状态的电压电流方向。电容电压的变化波形如图3所示。

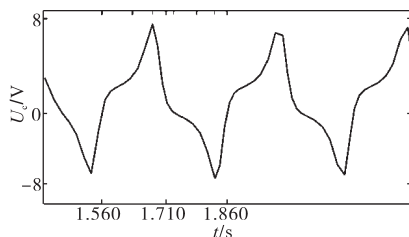


图3 电容电压波形图

Fig.3 Capacitance voltage waveform

由图3可以看出,在1个周期为0.3 s的均衡动作时间内,电容电压分别在正、负方向出现1次电压大小有所变化的同方向增长情况,即桥式换向,用于进一步增大单体电池间的电压差,提高均衡速率。

2 均衡系统控制

传统的双阈值方法多是单独从电压或者荷电状态内进行另一阈值选择,从而形成双阈值。如文献[19]中以最大电压差 ΔU 和电压标准差 σ 作为双阈值,当锂离子电池的SOC处于[0, 0.2]或[0.8, 1]阶段时,单位SOC内电压变化十分显著,电压阈值不论取值如何,都不能满足整个电池充放电过程的精度要求。文献[20]中以荷电状态均方差 ε 和荷电状态差值 ΔSOC 作为双阈值,同样不适用于电池充放电的全过程。故针对三元锂离子电池,提出双阈值实时分段方法,采用以端电压和荷电状态作为双阈值,合理分段并采用适当的阈值类型进行控制的方法,相较于传统的双阈值方法,该方法更适用于整个充放电过程在提高精度的同时,也避免了均衡电路控制中开关器件的频繁接入,从而降低器件损耗,提高均衡速率。

2.1 双阈值实时分段

端电压可以实时在线测量,因此该判据能够直观实时地反映出各个单体电池的充放电状态^[21];采用SOC可忽略单体电池间最大可用容量不一致性的问题,从而使所有电池同时达到均衡充放电的截止电压^[22]。一方面,双阈值方法能够有效改善电池组容量状态真实性以及过均衡现象的问题^[23];另一方面,在原有SOC估算的计算量大方面,引入端电压阈值增加了SOC估算精度,但计算量并未增加^[24]。

图4为锂离子电池固有的OCV-SOC特性曲线图。当电池SOC在0%~20%或80%~100%之

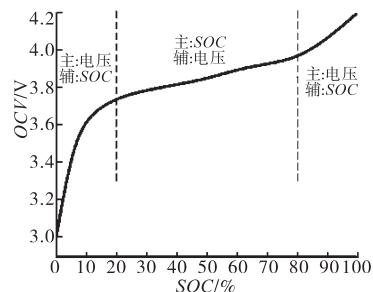


图4 实时分段区间图

Fig.4 Real time segmented interval graph

间时, OCV 急剧变化, 此时如果仅将 SOC 用作均衡变量, 则 SOC 的间距很小, 但是电压差很大。当 SOC 在 20%~80% 之间时, OCV 变化非常平缓, 如果此时仅使用电压作为均衡变量, 电压差非常小, 但是 SOC 的误差非常大。因此, 单个均衡变量不能完全表征电池组的不一致性。此时便需要进行及时分段, 调整判据, 达到更高精度的均衡效果。图4中已将电池的整个充放电过程分成3段, 并且每段都是由电压和 SOC 两个判据阈值一起决定均衡的开启关断, 只是两者的权重不同, 有主、辅之分。

2.2 双阈值的选择

阈值大小的选取可以影响到均衡效果的好坏。阈值偏大, 均衡效果不好; 阈值偏小, 均衡动作太快, 频率高, 均衡易启动, 整个均衡时间长, 对于硬件方面的要求就会变高。因此合理的阈值取值是至关重要的。其次, 不同类型电池的阈值选择也不相同, 需要具体分析处理。本文以三元锂离子电池为例, 说明合理选择阈值的方法。

ΔSOC 阈值大小的选择。图5是单位 SOC 内 OCV 变化率的曲线图。首先找到 OCV 最小变化率, 根据提前设定好的电压差值, 找出所对应的 SOC 值变化范围 ΔSOC ; 接着实时监测电池从 20% 到 80% 的电流值, 防止单方面的电流电压过冲现象造成的判据失准问题, 对此时的电流进行 SOC 估算, 作为校验 ΔSOC 取值正确合理性的依据, 整个流程如图6所示。

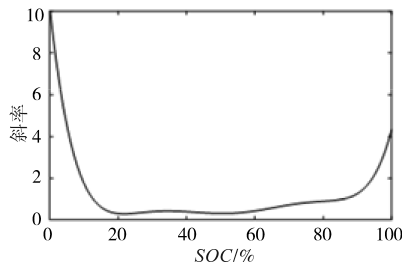


图5 OCV—SOC斜率图

Fig.5 OCV—SOC slope diagram

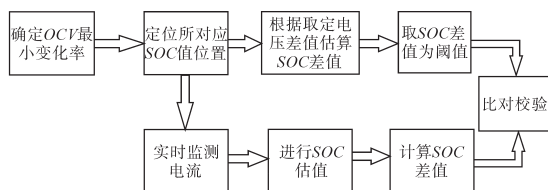


图6 阈值 ΔSOC 流程

Fig.6 Threshold ΔSOC process

ΔU 阈值大小的选择。如图7所示, 首先找到

SOC 最大变化率, 根据上述方法得到的 ΔSOC 阈值, 找出所对应的电压值变化范围 ΔU 。另外需要注意的是电池单体在充放电动作时存在电压的波动现象, 即在开关管导通时迅速出现小幅度电压下降的现象, 在关断时出现电压反向上升的现象, 其结果是使电压提前达到设定的均衡电压差阈值或反向超过此阈值, 造成均衡停止或者反向进行, 进而出现电池组反复均衡, 因此对于阈值的确定需要考虑2%的误差。

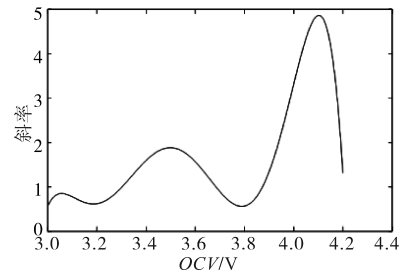


图7 SOC—OCV斜率图

Fig.7 SOC—OCV slope diagram

此处需要进行开路电压与端电压各自差值的对比分析, 目的在于建立 SOC 与端电压之间的联系。整个流程如图8所示。

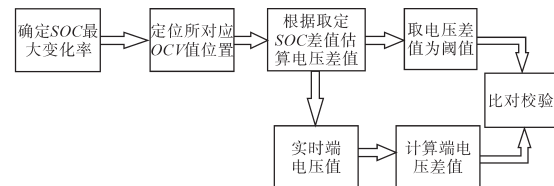


图8 阈值 ΔU 流程

Fig.8 Threshold ΔU process

在对 ΔSOC 的取值进行校验时选用安时积分法, 为了提高一定的精度, 作如下处理: 假设锂离子电池的初始荷电状态为 SOC_0 , 则在某个时间段内的剩余电量 SOC 为

$$SOC = SOC_0 \pm \frac{1}{Q_N} \int_{t_1}^{t_2} \eta \cdot I dt \quad (1)$$

式中: Q_N 为电池的额定容量; η 为充放电效率。在串联的单体电池中, 电流的大小相等, 由此可见 SOC 的取值主要在于初始值 SOC_0 的取值。此处, 将充放电过程的终止 Q_N 电压所对应的 SOC 作为 SOC_0 的值, 为了得到精确的 SOC 估算值, 需要在运用安时积分法时定期或不定期地对 SOC_0 进行修正。在不同时刻停止充放电时, 可以根据 OCV 与 SOC 的关系曲线, 确定此时的 SOC 作为下一个 SOC_0 , 防止安时积分法所带来的累计误差问题。

2.3 开路电压与端电压的换算

为获得三元锂离子电池动态响应过程,在Thevenin模型基础上,增加1组RC回路,组成二阶RC等效电路模型,达到兼顾电池稳态特性和暂态特性的作用,如图9所示。

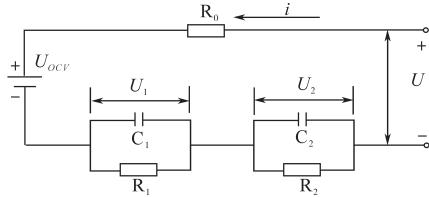


图9 二阶RC等效电池模型

Fig.9 Second order RC equivalent cell model

图9中, U_{OCV} 为电池的开路电压; R_0 为电池的等效欧姆内阻; R_1, R_2 为电池极化产生的等效内阻; U 为电池的端电压。根据基尔霍夫电压定律,可以得到以下的数学关系式:

$$U = U_{OCV} + iR_0 + U_1 + U_2 \quad (2)$$

$$U_1 = iR_1(1 - e^{-t/R_1C_1}) + U_1(0)e^{-t/R_1C_1} \quad (3)$$

$$U_2 = iR_2(1 - e^{-t/R_2C_2}) + U_2(0)e^{-t/R_2C_2} \quad (4)$$

根据式(2)~式(4)得出:

$$U(t) = G(SOC, t) - U_1(t, \tau_1) - U_2(t, \tau_2) - U_R(t) + s(t) \quad (5)$$

式中: t 为采样时刻; $G(SOC, t)$ 为电池OCV-SOC曲线的函数关系; $U_R(t)$ 为等效欧姆内阻的电压; $s(t)$ 为模拟环境因素的观测噪声; τ 为并联网路电阻与电容的关系;各参数都是随时间变化的动态参数。

在电池充放电过程中,如果电流不变,则在一个较短的时间内RC并联网路电压将达到最大,此时 $U(t)$ 和 $G(SOC, t)$ 之间只存在欧姆内阻和极化内阻所引起的电池内部变化,所以两块相同锂离子电池在SOC相差不大时,具有相同的内阻并且此时电池端电压的变化可以看做是开路电压与SOC的变化。

2.4 均衡控制策略

根据上述所提的双阈值判据,对整个均衡过程进行分段。首先确定电池组处于何种状态,是充电状态还是放电状态,需明确界限值定位电池组状态。其次,根据需要切换均衡电路,并且严格按照双阈值的判据条件进行均衡,实时观测电压变化情况。整个控制策略流程如图10所示。

将串联中的各个电池进行区间划分,并按照各电池的实时SOC估算进行划分,忽略其估算的

偏差性。其次是均衡阈值的确定,其双阈值都是在前期的计算工作中完成。

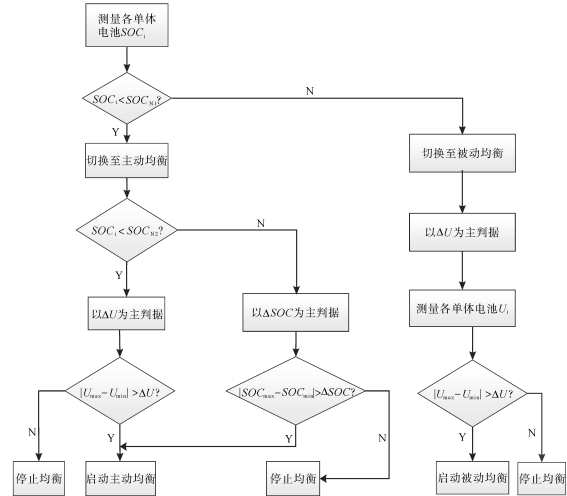


图10 混合控制流程

Fig.10 Mixed control process

3 均衡仿真实验与分析

根据上述对均衡控制电路结构与策略的分析,本文在Matlab/Simulink下构建了该电路的仿真模型,如图11所示。为充电均衡模型,放电均衡时只需要将恒流源以及电池初始SOC值进行相应调整即可。该模型包括1个控制模块、1个过渡模块、3个执行模块、4个电池模型和1个恒流源。仿真实验具体参数为:频率50 kHz, 占空比50%,电感1 mH, 电容10 μF, 恒流源±10 A, 电池标称电压3.7 V, 锂离子电池内阻8 mΩ, 电池额定容量10 A·h, Mosfet导通结电阻0.1 Ω, 寄生导通电阻0.01 Ω, 关断缓冲电阻1 kΩ。

实验模型具体模块介绍:

1)控制模块的作用是采集并比较电池组中各个单体电池的荷电状态SOC和电压U的大小,并根据控制策略中的分段均衡阈值进行相应数据的比较;若达到均衡条件,将均衡脉冲信号加在开关管上,启动均衡过程。

2)执行模块包括开关管、恒流源、电感、电容。开关矩阵由一对反向串联的Mosfet来代替双向导通开关,关断缓冲电阻用以保护均衡电路不会发生短路。

3)电池选用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。

4)Matlab-Function模块中的程序是比较各单体电池SOC值和U值,并计算各单体电池SOC

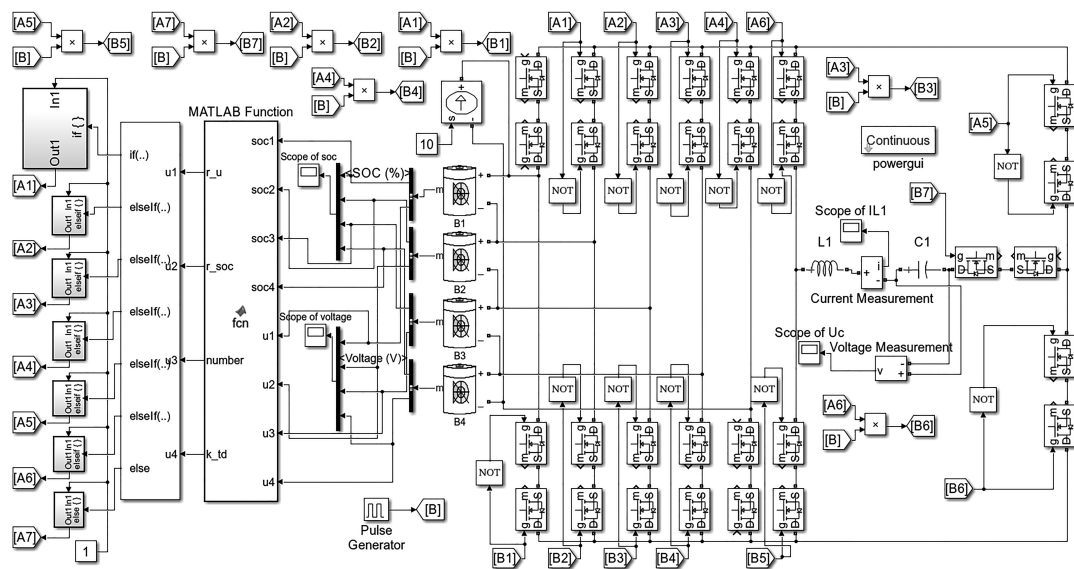


图11 均衡仿真模型

Fig.11 Active equalization simulation model

最大值和最小值的差值,以及各单体电池电压最大值以及最小值的差值。设定阈值后,通过 IF-Action 模块分别控制 8 对开关管驱动信号的产生与停止。条件如下: $\Delta SOC > 0.2\%$ 或者 $\Delta U > 0.01\text{V}$ 时开启均衡, $\Delta SOC < 0.2\%$ 或者 $\Delta U < 0.01\text{V}$ 时停止。

3.1 电池组静置状态实验与分析

电池组静置,即外部不对电池组充电或者放电,只在内部电池组之间进行均衡。当各电池 SOC 值出现较大差异时均衡效果更明显。实验前使得第 1 节电池 SOC 值为 90%,第 2 节为 85%,第 3 节为 82%,第 4 节为 75%,其均衡前后 SOC 值的变化如图 12 所示。

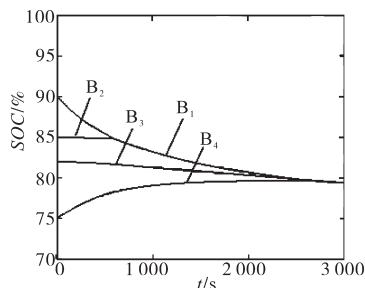


图12 静置过程

Fig.12 Static process

电池组中最大 SOC 差值设定为 15%,利用较大的电池 SOC 差值可以快速看出电池组均衡模块是否起到作用,以此检测均衡模块的可行性,其中包括主动均衡电路以及均衡策略。

3.2 电池组放电状态实验与分析

放电均衡用到的 4 节电池初始 SOC 分别是:

第 1 节电池为 87%,第 2 节为 86%,第 3 节为 84%,第 4 节为 80%。设置放电恒定电流值为 -10A ,混合均衡放电图如图 13 所示。由图 13 可见,在 600 s 附近整个电池组明显达到均衡效果。

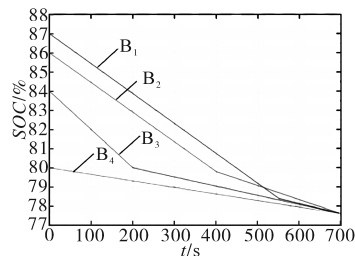


图13 混合均衡放电图

Fig.13 Mixed equilibrium discharge chart

表 1 为放电均衡仿真实验数据。实验开始前将 4 节电池模型的参数设置完成,数据采集时间以 100 s 作为间隔,在每个时间节点处进行 4 节单体电池的电压与 SOC 测算,取其平均值进行统计。

表 1 放电均衡仿真实验数据

Tab.1 Experimental data of discharge equalization simulation %

判据类型	均衡时刻/s							
	0	100	200	300	400	500	600	700
SOC 单阈值	84.25	82.34	81.06	79.92	79.02	78.21	78.23	77.14
双阈值	84.25	82.93	81.50	80.57	79.50	78.78	78.82	77.63

从实验数据可以看出,在放电过程中,双阈值均衡方法比 SOC 单阈值方法减缓了电池组约 6.9% 的放电速率,增加了均衡电路中开关管的响应时间,即当电池出现过放现象时有更多的反应处理时间。

3.3 电池组充电状态实验与分析

充电均衡用到的四节电池初始SOC分别为82%,80%,77%,75%,图14为各单体电池的SOC值变化曲线图。

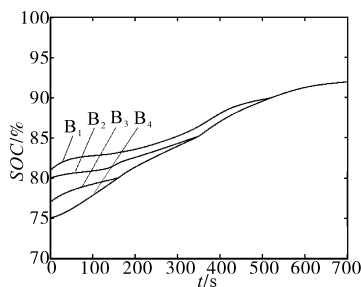


图14 混合均衡充电图

Fig.14 Hybrid equalization charge chart

由图14可知,在以10A恒定电流给电池组充电的情况下,电池组可以在520s附近达到理想的均衡效果;并且在整个电池组的SOC达到90%以上时出现了明显的缓和迹象,造成这一现象的原因在于,使用的是混合均衡,此时被动均衡接入电池组,使得均衡中的电流明显减小,虽然均衡时间加长,但在充电末期,可以防止由于不稳定的电压波动,造成的电池充满假象,防止过电压过电流的出现,并且一定程度上增加了电池的荷电容量。充电均衡仿真实验数据如表2所示。

表2 充电均衡仿真实验数据

Tab.2 Experimental data of charge equalization simulation %								
判据类型	均衡时刻/s							
	0	100	200	300	400	500	600	700
以SOC为单阈值	78.5	81.6	83.9	85.8	88.4	90.6	92.4	94.3
双阈值	78.5	80.2	81.7	83.4	85.4	88.1	90.8	92.5

如表2所示,对已存在的单阈值判据与本文所采用的双阈值判据进行实验数据的分析与对比。在每个测量时间节点,分别计算两种判据下4节电池的平均SOC值。可得到以下结论:

- 1)在相同的均衡结构中,单阈值方法在各个时间点的瞬时SOC值都高于双阈值的SOC值;
- 2)单阈值方法的SOC测量数据提前达到90%,并且后续充电时的SOC增长速率明显高于相同条件下的双阈值SOC测量数据;
- 3)综上所述,以双阈值作为判据的均衡策略使充电电池组的精度约提高了2%。

4 结论

本文通过研究主、被动混合均衡电路的理论

可行性,将主动均衡大电流特点与被动均衡简单控制特点相结合,提出与该电路相匹配的双阈值实时分段混合均衡控制方法,将电池组充放电均衡过程细化控制,配合开关管的导通与关断,对均衡电路进行控制,相较于单阈值判据的充放电均衡,该策略提高了充放电的精度。通过与同类型主动均衡电路中运用的单阈值均衡方法进行对比试验后,发现分段混合均衡除了完成基本的电池均衡目的以外,还明显降低了电池组充放电末期电流电压的增长速率,延长了电池组在过充过放时的反应时间,一定程度上改善了过充过放的弊端,并且整个均衡过程的速度并未因被动均衡的加入而减小。

参考文献

- [1] Ju F, Deng W, Li J. Performance evaluation of modularized global equalization system for lithium-ion battery packs[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2015, 13(2): 1-11.
- [2] 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.
- [3] Cui X, Shen W, Zhang Y, et al. Novel active LiFePO4 battery balancing method based on chargeable and dischargeable capacity[J]. Computers & Chemical Engineering, 2017, 97: 27-35.
- [4] 龚敏明,王占国,马泽宇,等. 锂离子电池组在线均衡系统设计[J]. 电源技术, 2016, 40(3): 539-542.
- [5] Zheng L, Zhu J, Wang G, et al. Model predictive control based balancing strategy for series-connected lithium-ion battery packs[C]// 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications, 2017.
- [6] 于仲安,邹浩,何俊杰,等. 高精度锂离子电池电压采集系统设计[J]. 电源技术, 2018, 42(7): 57-60.
- [7] Nejad S, Gladwin D T, Stone D A. A systematic review of lumped-parameter equivalent circuit models for real-time estimation of lithium-ion battery states[J]. Journal of Power Sources, 2016, 316: 183-196.
- [8] Zheng L, Zhu J, Wang G. A comparative study of battery balancing strategies for different battery operation processes[C]// Transportation Electrification Conference and Expo ITEC, 2016: 1-5.
- [9] Zheng Y, Ouyang M, Lu L, et al. On-line equalization for lithium-ion battery packs based on charging cell voltages: part 1. equalization based on remaining charging capacity estimation [J]. Journal of Power Sources, 2014, 247(2): 676-686.
- [10] Meng J, Ricco M, Luo G, et al. An overview and comparison of online implementable SOC estimation methods for lithium-

- ion battery[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(2): 1583-1591.
- [11] Mccurly L, Preindl M, Emadi A. Fast model predictive control for redistributive lithium-ion battery balancing[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64(2): 1-1.
- [12] Han W, Zou C, Zhou C, *et al.* Estimation of cell SOC evolution and system performance in module-based battery charge equalization systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4717-4728.
- [13] Nejad S, Gladwin D T, Stone D A. A systematic review of lumped-parameter equivalent circuit models for real-time estimation of lithium-ion battery states[J]. Journal of Power Sources, 2016, 316: 183-196.
- [14] 刘红锐, 夏超英, 黄日俊, 等. 一种基于LC振荡电路的串联蓄电池均衡器[J]. 电源技术, 2015, 39(1): 110-112.
- [15] LIM C S, LEE K J, KU N J, *et al.* A modularized equalization method based on magnetizing energy for a series-connected lithium-ion battery string[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1791-1799.
- [16] 原帅, 王悦, 李超. 电动汽车动力电池运行中SOC性能评估分析[J]. 内蒙古电力技术, 2016, 34(6): 81-84.
- [17] 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, 1075.
- [18] 一种新型动力电池组能量均衡系统研究[J]. 电源技术, 2015, 39(11): 2387-2390.
- [19] 陆新秀, 张鹏飞, 祝令阵. 基于LC振荡电路的锂离子电池组主动均衡器[J]. 电子质量, 2018(1): 9-12.
- [20] 林小峰, 王志浩, 宋绍剑. 基于双层结构的锂电池主动均衡控制系统[J]. 电子技术应用, 2016, 42(1): 119-122.
- [21] 张方亮. 基于滤波算法的锂电池SOC估算方法对比分析研究[J]. 电源世界, 2016(6): 21-23.
- [22] Quinn D D, Hartley T T. Design of novel charge balancing networks in battery packs[J]. Journal of Power Sources, 2013, 240: 26-32.
- [23] Zhong L, Zhang C, He Y, *et al.* A method for the estimation of the battery pack state of charge based on in-pack cells uniformity analysis[J]. Applied Energy, 2014, 113: 558-564.
- [24] 涂涛, 钟其水, 李波. 锂电池荷电状态估算Matlab仿真研究[J]. 电子设计工程, 2016, 24(20): 129-132.

收稿日期:2019-11-29

修改稿日期:2019-12-26