

混合动力汽车电池管理系统的均衡策略研究

张小荣, 冯国胜, 谷 枫, 邱文辉

(石家庄铁道大学 电气与工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 电池组的均衡技术是电池管理系统(BMS)的最关键技术之一。均衡技术可以大大减小电池组中各单体电池之间的差异, 有效防止过充电和过放电, 维持电池组的平衡, 从而延长电池组的使用寿命, 也极大地提高电池的使用效率。首先选择了电池均衡的判断标准, 列举了无损和有损均衡的利弊, 并着重分析了基于电感、电容、变压器等无损均衡方案, 选择基于变压器的无损均衡, 设计均衡电路与均衡控制策略, 通过试验论证方案可行性, 极大改善电池组各单体电池的不一致性。

关键词: 电池管理系统; 均衡控制策略; 无损均衡

中图分类号: U463.63⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2017)04-0068-05

0 引言

由于混合动力电动汽车兼具传统汽车和纯电动汽车的优点, 使其成为新兴新能源汽车领域的翘楚, 其关键技术之一就是动力电池技术, 而动力电池组的不一致现象成为了电池技术急需解决的难题之一。电池组中的单体电池由于制造工艺和使用条件不同, 其电压、内阻、容量也各有差异。如果在充放电过程中忽略这些差异, 则会长期导致过充电和过放电, 造成电池容量和寿命的急剧下降。因此对这些电池的不一致性进行合理的控制, 就尤为重要。

1 电池组均衡标准

1.1 以电池 SOC 为均衡判断标准

SOC 表示电池的荷电状态, 是用来反映电池的剩余电量。SOC 由电池的剩余容量与基准容量的比值来表示

$$SOC = Q_1 / Q_0 \quad (1)$$

式中, Q_1 为电池剩余容量; Q_0 为基准容量。

以 SOC 作为电池组均衡的标准, 首先将电池组中各个单体电池的 SOC 的平均值作为均衡目标。当电池组充放电的时候, 实时监测各单体电池的荷电状态, 当检测出与其他电池 SOC 相差较大的电池时, 启动电池均衡系统, 进行均衡管理, 直至差值小于设置的阈值。

1.2 以电池电压为均衡判断标准

以电压作为均衡的判断标准的前提是系统能够采集到精确的电池电压, 当单体电池中的最大压差大于阈值电压时, 启动均衡系统, 通过控制策略以保证各个单体电池电压保持大致相同。

经实验分析表明, 电池在充电的时候, 刚开始时电池电压曲线斜率较大, 充电速度快。当电池接近充满电时, 其电压的曲线斜率平缓, 充电速率降低; 电池在放电时, 起初各电池电压变化幅度较小, 接近放完电时, 电压变化幅度很大, 因此从电池电压的曲线上就可以很直观地看出电池是否有过充电和过放电现象^[1]。当检测到各个电池电压不相同, 启动均衡控制系统使个别电池停止充电或者放电, 从而防止了

收稿日期: 2016-09-09 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2017.04.13

基金项目: 河北省引进留学人员资助项目(C2015005019); 石家庄市科研计划项目(161080401A)

作者简介: 张小荣(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事混合动力汽车电池管理系统的研究。E-mail: 18732190686@163.com

张小荣, 冯国胜, 谷 枫, 等. 混合动力汽车电池管理系统的均衡策略研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2017, 30(4): 68-72.

个别电池发生过充电或过放电,这样保护了电池,延长电池组的寿命。

1.3 均衡判断标准的选择

以电池 SOC 为均衡标准虽然具有很好的均衡效果且控制简单,是一种较为理想的均衡,但只局限于理论上可行。目前世界上还没有能够准确计算电池 SOC 的方法,导致电池 SOC 的检测结果存在很大误差,这种均衡判断标准短时间不会采用。虽然现在利用建立电池模型可以估算电池的 SOC,但模型十分复杂,加上与电池的物理化学过程有关,对估算电池的 SOC 处理器要求很高,使得其应用受到了限制^[2]。

由于电池电压易检测并且比 SOC 测量精度要高得多。所以,目前大多采用电池电压为均衡的标准。

2 均衡方案

2.1 有损均衡

有损均衡也称作被动均衡。该均衡方法是对电压高的单体电池进行放电以减小高电压电池与其他电池的压差来完成均衡的。实体电路简单直观,就是每个单体电池通过一个开关并联一个功率电阻。当单体电池电压过高需要均衡时,开关闭合,将电池多余的电量通过功率电阻放电转化成热能的形式完成放电过程,当电压下降到均衡目标电压后开关打开,停止均衡过程。

有损均衡简单可靠,便于控制。但是均衡效率太低,造成能量的浪费,并且电阻放电产生的热量进一步加剧了电池组的不一致性,使得箱体内的温度升高,不便于电池组的热管理^[3]。所以该均衡方案不适合超级电容和快速充放电的电池组的应用,较适合应用于充电模式下抑制最强的电池单元的电压爬升。

2.2 无损均衡

无损均衡也称为主动均衡,主要是通过一些储能元件,比如电容、电感、变压器使能量进行转移,将单体电池电压高的电池能量转移到电压低的电池,实现电池组的均衡。

2.2.1 基于功率电感的无损均衡

通过电感实现电池组中压差最大的两个单体电池之间的能量转换,称作“飞度电感法”^[4]。电路结构如图 1 所示。图中两个 MOSFET 管 MOS1 和 MOS2 作为功率开关用来控制均衡电路的开启和关闭;D1 和 D2 为续流二极管,为放电回路提供放电通道;L 为均衡电路主要器件——功率电感,作为能量转移的载体;R 为 L 的消磁电阻,用于释放均衡过程中多余的能量;B1 和 B2 为假定需要均衡的两块单体电池。

电池组在工作过程中,检测 B1 和 B2 两端的电压,判断是否满足均衡条件。当二者压差大于预先设定的阈值电压时,开启均衡模式。假设 $B2 > B1$,均衡开启后,整个过程分为 B2 放电、B1 充电、L 消磁 3 个阶段。

放电过程:软件控制命令 MOS1 闭合,MOS1、L、B2 形成放电回路,B2 开始放电,使得部分电能存储在 L 中。

充电过程:软件控制命令 MOS2 闭合,MOS1 断开,使得 MOS2、L、B1 形成充电回路,L 对 B1 进行充电。随着充电时间的增加,充电电流随之减小,当 L 两端电压低于 B1 和 MOS2 的导通电压时,充电过程随之结束。

L 消磁过程:当充电过程结束时,L 两端电压并不为 0,只是不足以继续对 B1 进行充电而已,但其内部仍有能量剩余。为保证电路参数的稳定,增加了消磁电阻 R。充电过程结束时,L、R、MOS2 以及 B1 组成谐振电路,耗散 L 中的部分剩磁,确保下次均衡过程的稳定^[5]。

该设计方案以电感作为能量转移的载体,实现了均衡电路的双向均衡,是行之有效的均衡方法。

2.2.2 基于变压器的无损均衡

变压器均衡电路不同于其他无损均衡系统,它的均衡过程发生在单体电池与整个电池组之间。当某单体电池电压过高时,通过并接在该电池上的绕组将多余的能量传输到电池组,此为顶部均衡法;当某单体电池电压过小时,整个电池组的能量通过并接在该电池上的绕组传输到该电池内,实现底部均衡,起到“削峰填谷”的效果。众所周知,变压器有隔离负载的作用,此作用也适用于均衡电路。

基于变压器的无损均衡电路原理如图 2 所示。每个变压器的原边并联后,通过 MOS 管连接到整个

电池组的正负极,副边通过功率二极管与每个单体电池并联。当检测到某一电池电压过低时,控制 MOS 管导通,启动均衡,电池组通过变压器,对该电池进行充电,此时二极管处于正向导通状态,完成底部均衡^[6]。顶部均衡过程相反。

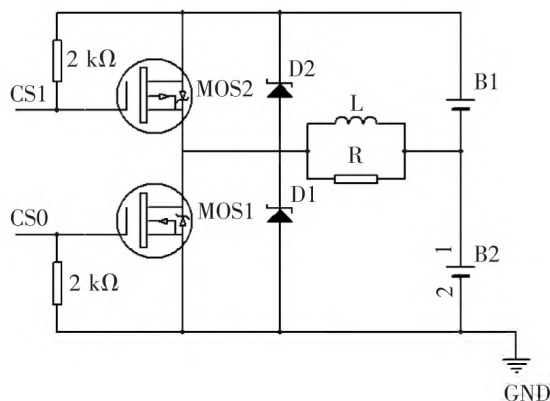


图 1 基于功率电感的无损均衡

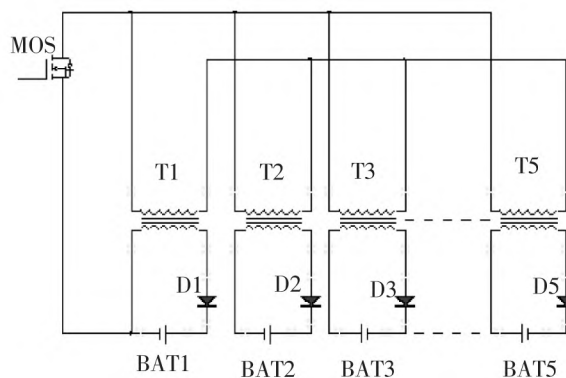


图 2 基于变压器的无损均衡电路

2.2.3 基于电容的无损均衡

电池组的均衡过程中,以电容充当能量转移载体的均衡称为“飞度电容法”^[4]。电容器在单体电压最高和最低的电池中并联切换,完成电量从高压电池向低压电池的转移。其中对参加均衡的两块电池的位置无要求,均衡效果不受影响。均衡过程中的电流大小与单体电池的压差成正比,均衡的起初,电流大,随着时间的增加,压差趋于平缓,电流也随之减小,直至均衡的关闭,电流降为 0。其中均衡后期由于电容与电池的电压趋于相等,使得均衡速率缓慢。

基于电容的无损均衡分为分散式和集中式两种。集中式均衡如图 3 所示。所需电子开关数比单体电池数多一个,电容器只需一个。假定首末两端的电池压差最大,且 $B1 > B4$,压差大于阈值电压,需要均衡,则开启均衡。分为电容充电和放电两部分。

电容充电过程:软件系统控制命令 $S1$ 和 $S2$ 开关闭合, $B1$ 对电容充电,当电容两端电压与 $B1$ 电压持平时,充电过程结束。

电容放电过程:软件系统控制命令 $S1$ 和 $S2$ 开关断开, $S4$ 和 $S5$ 开关闭合,电容对 $B4$ 充电,二者电压持平时,放电过程结束。至此, $B1$ 的多余电量通过电容载体转移至 $B4$ 中,完成均衡。

与集中式均衡对应的是分散式均衡。均衡电路如图 4 所示。所需电子开关数与单体电池数相同,电容器的个数比电池数少一个。每个电容通过双向开关与对应的电池并联。假定 $B1$ 与 $B2$ 的压差最大,且 $B1 > B2$,压差大于阈值电压,开启均衡。

电容充电过程:软件系统控制命令开关 $S1$ 和 $S2$ 拨向左侧, $B1$ 对 $C1$ 进行充电,电容电压与电池电压持平时,充电过程结束。

电容放电过程:软件系统控制命令开关 $S1$ 和 $S2$ 拨向右侧, $C1$ 对 $B2$ 进行充电,二者电压持平时,放电过程结束。

至此,完成电量从 $B1$ 到 $B2$ 的转移。然后电量再从 $B2$ 转移到 $B2$,转移过程同上。至此,均衡过程完成。

分散式均衡控制简单直观,对采集电压的精度要求不高。但是电量转移过程过于繁琐,如果参加均衡的两个单体电池位于电池组首末两端,则整个电池组的电池都要参与均衡过程,浪费时间和能量且效率低下。集中式均衡相对节省器件,只需要一个电容,自然能量损耗也相对减少,并且针对性强,只有压差最大的两个单体电池参与均衡过程,加快了均衡速度。但受制于电容数量少,导致效率不高也是难免的,且控制方法相对复杂^[7]。

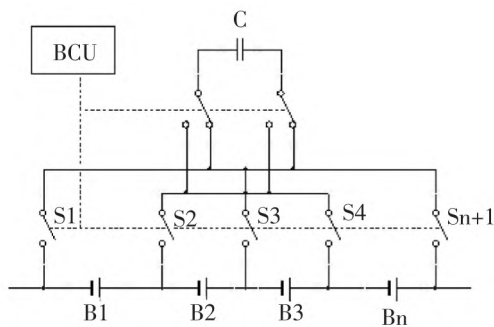


图3 基于电容的集中式无损均衡

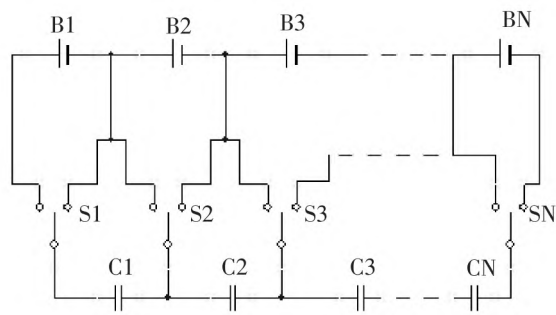


图4 基于电容的分散式无损均衡

3 实例验证

综上所述,采用基于变压器的无损均衡作试验效果验证。

下面就变压器无损均衡进行电路设计。电路如图5所示。均衡电路的核心为正激式变压器,采样双向DC—DC变换器。电池组由6块单体电池组成,每节电池通过功率开关管连接到变压器副边绕组。变压器的原边也通过开关连接到电池组总的正负极。假设第四节电池电压最高,且压差大于阈值电压,则均衡开启:MOS1、MOS3、MOS4导通,软件控制MOS2以200 kHz、85%的占空比导通变压器的副边,通过变压器电磁转换将第一节电池的能量转移到电池组上完成顶部均衡。同理,当第四节电池电压最低时,MOS4、MOS2、MOS3导通,软件控制MOS1以200 kHz、85%的占空比导通变压器的原边,将电池组的能量转移到第一节电池上,完成底部均衡。

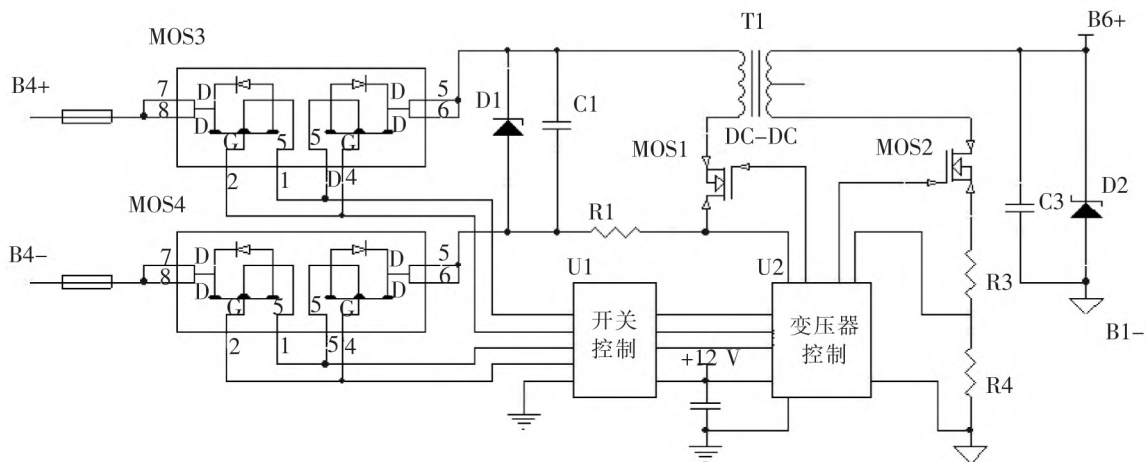


图5 基于变压器的无损均衡电路设计

3.1 均衡控制策略

防止过充电均衡:单体电池最大压差大于阈值电压(10 mV)时,电压最高的单体电池将能量转移到整个电池组,当压差小于阈值电压时,停止均衡,完成顶部均衡。

防止过放电均衡:单体电池最大压差大于阈值电压(10 mV)时,整个电池组将能量转移到电压最低的单体电池,当压差小于阈值电压时,停止均衡,完成底部均衡。

3.2 试验效果验证

取5节荷电状态为180 A·h、标称电压12 V的铅酸蓄电池,1节同等规格的荷电状态几乎为0的铅酸电池,共6节电池串联成组,开启均衡,阈值电压设置为10 mV,12 h后停止均衡。

使用DSS1K8E智能电池容量检测仪对电池组放电,设置放电电流为25 A,放电单体阈值电压设置为3 V(则电池组串联电压为 $3 \times 6 = 18$ V),单体保护阈值电压设置为2.8 V(当单体最小电压低于2.8 V时停止放电)。为提高试验结果精度,进行二次均衡与二次放电。试验结果记录于表1。

表 1 试验结果

试验次数	均衡时间/h	放电时间/h	放电量/(A·h)
第一次	12	6	$99.458 \times 6 = 596.748$
第二次	4	2	$35.738 \times 6 = 214.428$

电池组无损均衡后放电总量为： $596.748 + 214.428 = 811.176(\text{A} \cdot \text{h})$ 。

电池组均衡之前总荷电状态为： $180 \times 5 = 900(\text{A} \cdot \text{h})$ 。

均衡转移效率为： $811.176 \div 900 \approx 90.1\%$ 。

4 结束语

通过分析论证了电池组均衡技术的各种方案,并根据各自的优缺点做了分析研究。其中有损均衡因其诸多弊端而被市场淘汰。无损均衡中行之有效的是基于功率电感和变压器的均衡方案。兼顾经济与实用性,基于变压器的双向无损均衡方案,对铅酸蓄电池组进行均衡管理,由试验结果可看出,其均衡效率可高达 90%,能量耗散小,便于热管理。其均衡时的大电流大大减少了均衡时间,对混合动力汽车的电池管理系统具有实用意义,应用前景广阔。

参 考 文 献

- [1]司康. 电动汽车核心技术之动力电池及管理系统(三)——电池管理系统及其关键技术[J]. 交通世界:运输车辆,2012(9):40-44.
- [2]Lee Y S, Cheng M W. Intelligent control battery equalization for series connected lithium-ion battery strings[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(5): 1297-1307.
- [3]孙先赏,冯国胜. 基于 DSP 和 Labview 电动汽车电池的监测与通信[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(3): 86-90.
- [4]宋雪桦,吴和生,刘锦娟. 混合动力汽车电池管理系统设计[J]. 电子测量与仪器,2011(4):38-42.
- [5]王磊. 电动汽车超级电容器组均衡系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [6]封家敏. 锂离子电池管理系统研究及语音报警电路设计[D]. 天津:南开大学,2011.
- [7]陆科,吴志红,朱元. 一种新能源汽车电池管理系统主动均衡方案[J]. 电子产品世界,2012(3):29-33.

Research on Equilibrium Strategy of Hybrid Electric Vehicle Battery Management System

Zhang Xiaorong, Feng Guosheng, Gu Feng, Qiu Wenhui

(Department of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Battery pack equalization technology is one of the most critical technologies in battery management system (BMS). Equalization technique can greatly reduce the difference between each single battery in the battery, effectively prevent overcharge and overdischarge, maintain battery balance, thereby prolonging the service life of the battery, and also greatly improve the use efficiency of the battery. This paper first selects the standard for battery equalization, enumerates the advantages and disadvantages of lossless balance and loss balance, and emphatically analyzes the inductance and capacitance, transformer and other lossless equalization scheme based on lossless transformer. Based on equilibrium selection, equalization circuit and balanced control strategy is designed, which is proved feasible, greatly improved the inconsistency between single cells of the battery group.

Key words: battery management system; balance control strategy; lossless equalization