串联电池组并行均衡管理研究与应用

高万兵
(宇通客车股份有限公司, 郑州 450000)

摘 要:基于串联电池组最大可用容量分析,研究并行均衡方式的可行性及影响因素,应用脉宽调制技术控制均衡电流,通过均衡与采集线缆分时复用技术,确保串联电池组均衡的一致性,并通过试验验证和工程化应用。

关键词:串联电池组; 并行均衡管理; 脉宽调制; 模块化均衡
中图分类号:U469.72; TM912 **文献标志码**:A **文章编号**:1006-3331(2023)01-0015-05

Research and Application of Parallel Balanced Management of Series Battery Groups

GAO Wanbing
(Yutong Bus Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Based on the maximum available capacity analysis of series battery groups, the author researches the feasibility and influencing factors of parallel balanced mode and applies the pulse width modulation technology to control the balanced current, ensures the consistency of series battery groups balance through the time-sharing multiplexing technique of balance and acquisition cables. Finally, he does the verification test and engineering application.

Key words: series battery groups; parallel balanced management; pulse width modulation; modular balanced

锂电池已广泛应用于电动汽车和电力储能,为了达到车载电源等装置的电压、功率以及能量的需求,需要将多支锂电池电芯通过串并联方式组成电池系统[1]。实际使用过程中,即使是做过严格成组筛选的电池组,在经过一段时间使用后,电量衰减速度也远比单体电池快,主要原因是电池组中电芯的一致性问题[2]。目前行业内主要采用由电池管理系统内部均衡和由非电池管理系统外部均衡两种方式解决。因成本和散热问题,电池管理系统内部均衡电流有限,一般为 100 mA 左右,均衡速率较低,且不适用于大容量电池系统[3];而外部均衡方式因均衡电流大,均衡速度快,受到业界普遍推崇。外部均衡策略主要有基于电池电压和容量两种方式:基于电压的均衡策略,不需要复杂的计算,是常用的一种方法,但均衡策略受均衡线路压降的影响,电池均衡的一致性难以保证;基于容量的均衡策略,需要对单体电池的 SOC 进行估算,该方法依赖于高精度的 SOC 算法,计算难度大,实现较为复杂[4],在实际应用中因电池一致性受内阻、容量、自放电率等因素影响,实际的均衡效果也不理想[5-6]。

本文通过对串联电池组最大可用容量进行分析[7],提出一种基于单体电池电压的串联电池组并行外部均衡方法(以下简称“并行均衡”)。该方法应用脉宽调制技术控制均衡电流,采用均衡线缆与采样线缆分时复用技术,消除均衡线缆压降对串联电池组一致性的影响,确保串联电池组均衡的一致性。

收稿日期:2022-12-18。

第一作者:高万兵(1985—),男,硕士;高级工程师;主要从事车载能源管理及安全技术研究工作。E-mail:gwb2008.ok@163.com。

1 串联电池组并行均衡管理

1.1 串联电池组最大可用容量

以某电动商用车为例,其电池系统使用 192 支单体容量为 228 Ah、额定电压为 3.22 V 的磷酸铁锂电池经过串联后组成 618.24 V、228 Ah 的串联电池组,再由 3 个串联电池组经过并联组成电量为 422.876 kW·h 的电池系统,每个单体电池电压可通过电池管理系统实时采集。本文讨论其中串联电池组的均衡技术。

容量和 SOC 不一致的串联电池组中单体电池的容量表示为向量 $\boldsymbol{C}=[C_1,C_2,C_3,\cdots,C_n]$。SOC 的向量表示为 $\boldsymbol{SOC}=[SOC_1,SOC_2,SOC_3,\cdots,SOC_n]$。对组内某个单体电池 m 来说,充电容量 C_c 为[8]

$$C_c=C_m\cdot(1-SOC_m) \tag{1}$$

可放电容量 C_d 为

$$C_d=C_m\cdot SOC_m \tag{2}$$

无均衡电池组的最大可充电容量 C_x 为

$$C_x=\min[C_1\cdot(1-SOC_1),C_2\cdot(1-SOC_2),C_3\cdot(1-SOC_3),\cdots,C_n\cdot(1-SOC_n)] \tag{3}$$

同理,电池的最大可放电容量 C_y 为

$$C_y=\min(C_1\cdot SOC_1,C_2\cdot SOC_2,C_3\cdot SOC_3,\cdots,C_n\cdot SOC_n) \tag{4}$$

由此得出,电池组的最大可用容量 C_p 为[8]

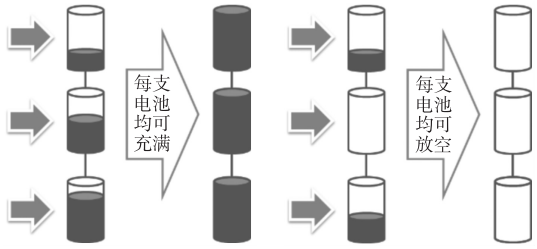
$$C_p=C_x+C_y \tag{5}$$

$$C_p=\min[\boldsymbol{C}\otimes(1-\boldsymbol{SOC})]+\min(\boldsymbol{C}\otimes\boldsymbol{SOC}) \tag{6}$$

式(6)中,⊗表示向量元素对应相乘。

根据上述分析可知,在没有均衡的电池组中,电池组的最大可用容量是由电池组内充/放电能力最弱的单体电池决定。若充电能力最弱和放电能力最弱的不是同一个单体时,则电池组的最大可用容量将小于电池组内任一单体电池的实际容量[8]。

如果能将串联电池组中每一个电池单体均充满或放空,如图 1 所示,那么电池组的可用容量将只受容量最小的单体电池影响,串联电池组的理论使用寿命近似等于电池组中短板电池的寿命,如图 2 所示。



(a)充电均衡 (b)放电均衡

图 1 串联电池组均衡充/放电示意图

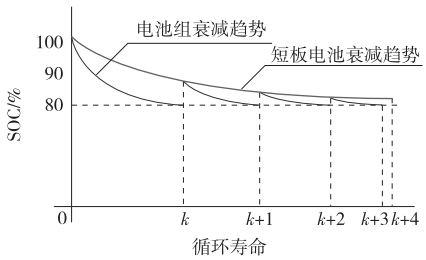


图 2 串联电池组均衡效果的理论寿命示意图

1.2 并行均衡及影响因素

并行均衡是指对串联电池组中各单体电池通过同步充电或放电的方式进行均衡,实现电池组中所有单体电池的上限电压或下限电压一致,保证电池组中所有单体电池在放电或充电时充分发挥各自的能量。本文主要论述并行充电均衡方式。

串联电池组中每支单体电池电压可实时采集,所以将单体电池电压作为均衡策略判断条件,在恒流充电过程中,单体电池的端电压 $V(t)$ 可用 Rint 模型表示,即:

$$V(t)=V_0(t)+IR_i \tag{7}$$

式中:$V(t)$ 表示 t 时刻电池端电压;$V_0(t)$ 表示电池的开路电压;R_i 表示充电过程的直流内阻,取充电电流方向为正;IR_i 表示电池内阻引起的过电势。即认为单体电池的端电压是由 OCV、直流内阻、充电电流共同决定的[9]。

对于同一体系中同一型号的电池,老化过程中电池的开路电压与 SOC 的关系近似稳定,因此电池组中单体电池电压的差异主要取决于充电电流和电池内阻[10]。电池组均衡过程中,充电电流的一致性可以检测和控制,但均衡线路的电阻会直接影响电池端电压的检测,即其与电池端电压是耦合的。

均衡线路电阻包括电池内阻和均衡线缆的电阻。

电池内阻包括欧姆内阻和极化内阻。欧姆内阻由电池电极材料、电解液、隔膜、极柱等零部件的电阻和之间的接触电阻决定。极化内阻是由电化学反应中的电化学极化和浓度极化造成[9],受电池充电倍率的影响。在电池组恒流均衡过程中,极化内阻对电池组端电压差异的影响极小,甚至可以忽略,但均衡线缆的电压降对电池的均衡一致性影响较大。下面以 4 通道均衡装置分析线路压降对电池均衡效果的影响,图 3 为 4 通道均衡设备 N+1 根线电流分布图。其中,N 为单体电池数量;L_1~L_5 是该电池组的 5 根采样和均衡线,I_1~I_4 分别为通道 1~通道 4 输出的均衡电流。

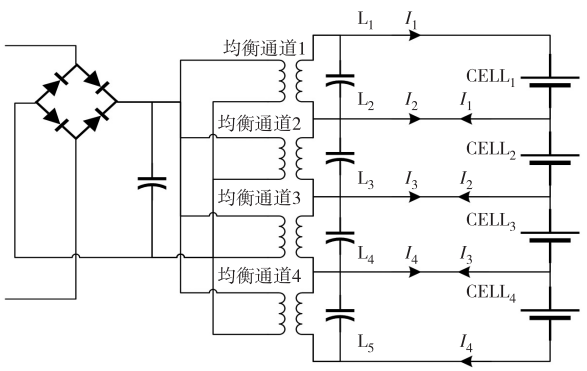


图 3　4 通道均衡设备均衡电流分布图

假设 L_1~L_5 每根线的截面积为 0.5 mm^2,L_1~L_4 长 1 m,L_5 长 1.1 m,铜的电阻率为 0.017 2 Ω·mm^2/m,那么根据计算电线的电阻计算公式 $R=\rho l/S$ 得:L_1~L_4 每根线的电阻为 0.034 4 Ω,L_5 的电阻为 0.037 84 Ω。

当所有通道均以 5 A 电流恒流均衡时,从图 3 可以看出,L_2~L_4 上的电流正负抵消为零,L_2~L_4 上无电压降。通道 2 和通道 3 端口采样到的电压分别为 $CELL_2$ 和 $CELL_3$ 的电压。由于 I_1 在 L_1 上产生的电压降为 0.172 V,I_4 在 L_5 上产生的电压降为 0.189 2 V,通道 1 端口采样到的电压比 $CELL_1$ 实际电压高 0.172 V,通道 4 端口采样到的电压比 $CELL_4$ 实际电压高 0.189 2 V。如果以 3.6 V 作为均衡截止的判断条件,每个电池初始状态一致,$CELL_4$ 将最先均衡截止,实际截止电压为 3.410 8 V;其次是 $CELL_1$ 均衡截止,实际截止电压为 3.428 V;最后是 $CELL_2$ 和 $CELL_3$ 根据均衡线路电阻大小先后截止。

实际中,电池状态和各通道的均衡线路电阻存在差异,且一致性难以控制。按照上述分析,电池截止电压会存在较大差异,均衡电流越大,线缆长度差异越大,线缆上产生的压降就越大,电池经过均衡完成后一致性越差。达到一定程度时,均衡设备无法起到均衡的作用。因此,电池组均衡时消除均衡线路电阻影响,是保证电池一致性的关键。

1.3　并行均衡的解耦控制

采用 N+1 根线缆对串联电池组均衡时,电池组中各单体电池的均衡截止电压存在较大差异。本文提出均衡与采集线缆分时复用技术,输出线缆为 N+1 根,采用脉宽调制技术控制均衡电流,在电池均衡末端采用 PWM 波的形式控制输出电流,在输出电流为 0 时,对单体电池的电压进行检测,消除均衡线路电阻对单体电池电压检测值的影响,从而实现了均衡过程中,电池端电压与均衡线路电阻的动态解耦,既解决了均衡线路电阻对电池组一致性的影响,也可以保证各电池均衡后的一致性状态。同时,通过并行均衡,可以准确检测串联电池组中每个单体电池的容量,对于内阻大或自放电率大的电池也可以通过多次循环均衡的方式有效识别。

通过控制电池组中各单体电池的电压和电流,实现同电压、同电流均衡截止,这种均衡方式与基于容量估算的均衡策略相比,有效地规避了因电池内阻差异、容量差异、均衡线路电阻等因素对电池组均衡效果的影响,降低了电池管理系统状态估算的难度,使电池组中各单体电池的均衡更加可靠、有效,尤其针对上千支、上万支单体电池组成的商用车车载储能系统和电力储能系统,能够在短时间内最有效地实现均衡和故障电池诊断。

2　模块化并行均衡充电系统

根据大规模电池成组特点,并行均衡充电系统采用模块化结构,如图 4 所示。每一个均衡通道对应电池组中的一支单体电池,基于商用车电池组主要以 12 支或 16 支单体电池组组成,本文以每 12 个均衡通道为并行均衡充电系统的基本单元,每个基本单元中的 12 个均衡通道采用串联结构,最多可同时实现 12

支单体电池串联电池组的均衡。如果电池组串联数量多于 12 支且小于等于 24 支,可采用 2 个均衡单元对电池组进行均衡,以此类推。每个通道的输出为恒流 5 A;可根据不同的电池体系,设计不同的工作模式和截止电压值。系统采用脉宽调制均衡控制技术,保证各单体电池均能达到自身的最大容量,确保将动力锂电池组的不均衡度控制在允许的范围内,从而提高动力锂电池组的循环寿命。均衡系统支持对每个单体电池电压的实时检测和监控、均衡能量的自动测算、测试数据的自动保存。同时,均衡系统设计多重保护措施,以确保电池及均衡系统的安全。

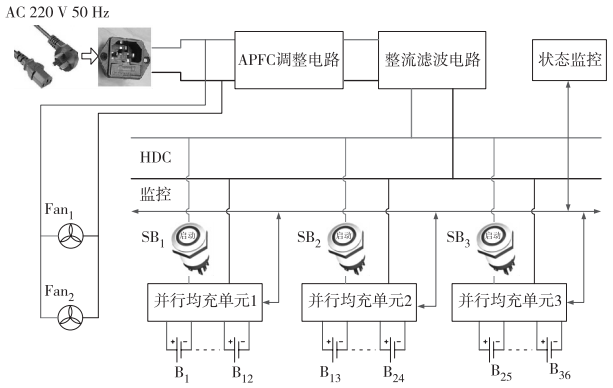


图 4 电池组并行均衡系统原理框图

均衡系统分为三大功能单元:APFC 单元、12 通道并行充电单元和主控单元。APFC 单元将交流电转换为高压直流,同时实现高功率因数并抑制启动冲击电流;12 通道并行充电单元检测接入的电池支数以及电池电压是否符合均衡要求,若符合要求,均衡模块输出电流为每支电池均衡;12 通道并行充电单元同时与主控单元通讯,上传相关均衡信息,主控单元支持将相关信息存入到 SD 卡中,当电池达到均衡结束条件后,并行均衡单元停止对此电池的均衡,直到所有电池完成均衡,并行均衡系统停止工作。APFC 单元和主控制器的原理框图如图 5 所示,主电源板主要由 EMI/C 整流滤波单元、预充电单元、APFC 功率转换单元、高压直流输出控制单元、辅助电源单元及主控制器单元组成。

12 通道并充单元由 12 个并充模块、辅助电源、并充单元主控板组成。其中并充模块采用恒流恒压双闭环控制,恒流值为 5 A,恒压为 4.85 V;当模块输出电压大于 4.85 V 时判定为模块故障,并输出报警信号。

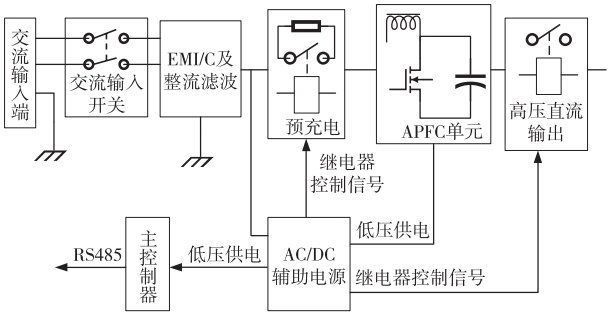


图 5 APFC 与主控制器原理框图

3 试验结果

任意挑选 12 支初始电压大于 2.5 V,容量为 40 Ah 的单体电池进行成组(其中三支一致性较差),单体电池容量与内阻的对应关系如图 6 所示。从图中可以看出该组电池的最大容量为 42.276 Ah,最小容量为 34.063 Ah,容量差最大为 8.213 Ah;最大内阻为 2.917 mΩ,最小内阻为 0.544 mΩ,内阻差最大为 2.373 mΩ。

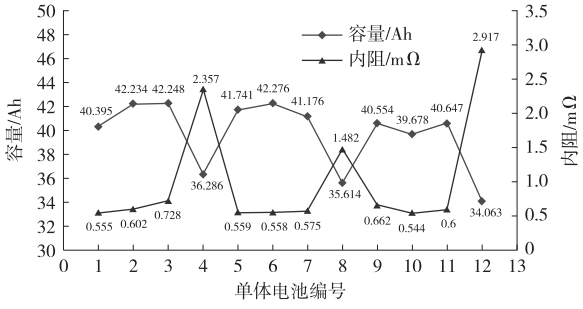


图 6 电池组单体电池的容量与内阻对应关系

将单体电池按照编号 1~4、5~8、9~12 分为三组,分别将它们的荷电状态调整至 10%、30%、50%进行串联成组测试。

使用并行均衡系统均衡前后的电池组充放电容量对比如图 7 所示。均衡前,电池组充放电容量为最小单体电池容量的 50%(即 17Ah 左右);均衡中,电池组充放电容量从最小单体电池容量的 50%左右提高到最小单体电池容量的 100%;均衡后,进行三次充放电循环,电池组充放电容量仍保持在最小单体电池

容量的 98.79%以上,且保持稳定,说明维护效果良好,并行充电维护设备可以对一致性较差的电池组进行均衡。

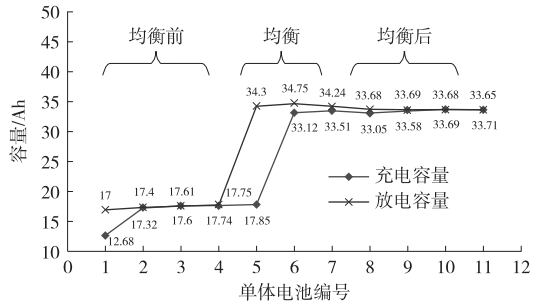


图 7　串联电池组均衡前后的充放电容量对比

均衡前后的单体电池放电末端电压对比如图 8 所示。均衡前,从各单体电池的末端电压无法判断电池优劣;均衡后,容量较低的电池与其他电池放电末端压差很大,使用此设备进行电池组均衡后,再对整组电池进行放电,根据电池组的末端压差可以剔除容量较低的电池。同理,采用均衡系统均衡后,将电池组搁置一段时间后再进行放电,可以对自放电率较大的电池进行分选。

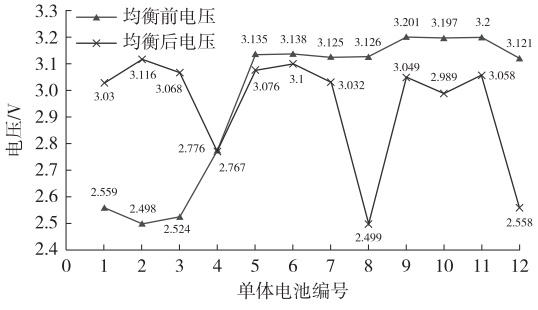


图 8　电池组均衡前后的单体电池放电末端电压对比

4　结束语

将本文所述的串联电池组并行均衡系统用于某大型兆瓦级储能项目,系统容量提升超过 15%,且均衡后系统容量保持稳定。并行均衡技术可对一致性较差的串联电池组进行均衡维护,并保证在串联电池组中的各单体电池以同电流、同电压充电时截止均衡。均衡后,串联电池组中所有单体电池的动态末端电压将调整至较小的偏差范围内,保证电池组中各单体电池一致性,最大限度地发挥电池组的放电容量。同时,并行均衡系统可定位电池组中容量较低的电池,以便对容量衰减较快的电池进行定位。

参考文献:

[1] 唐溪浩,马骁,邱旦峰,等. 电动汽车电池管理系统研究进展[J]. 电源技术,2018,42(2):308-311.

[2] 赵伟,闵捷,李章溢,等. 基于一致性模型的梯次利用锂离子电池组能量利用率估计方法[J]. 电工技术学报,2021,36(10):2190-2198.

[3] 赵子翔. 电动汽车电池组解耦型模块化主动均衡系统的研究[D]. 成都:西南交通大学,2021.

[4] YE Yuanmao, CHENG Eric Kawai. Analysis and design of zero-current switching switched-capacitor cell balancing circuit for series-connected battery/supercapacitor [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(2): 948-955.

[5] 李玉,徐俊,彭程,等. 结合变压器正反激原理的动力电池主动均衡方法[J]. 西安交通大学学报,2019,53(8):151-158.

[6] 汪玉洁. 动力锂电池的建模、状态估计及管理策略研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2017.

[7] DIAO Weiping, XUE Nan, BHATTACHARJEE V, et al. Active battery cell equalization based on residual available energy maximization[J]. Applied Energy, 2018(210): 690-698.

[8] 郑岳久. 车用锂离子动力电池组的一致性研究[D]. 北京:清华大学,2014.

[9] 李斌. 动力电池组不一致性及其均衡研究[D]. 长沙:湖南大学,2020.

[10] 韩雪冰,欧阳明高,卢兰光,等. 电动车磷酸铁锂电池衰减后开路电压特性分析[J]. 电源技术, 2015,39(9):1876-1878.