

DOI: 10.7500/AEPS20130330001

用于储能系统的梯次利用锂电池组均衡策略设计

马泽宇¹, 姜久春¹, 文 锋², 郑林锋¹, 郭宏榆¹, 时 玮¹

(1. 北京交通大学国家能源主动配电网技术研发中心, 北京市 100044; 2. 北京市亿能通电子有限公司, 北京市 100044)

摘要: 以北京奥运会纯电动大巴车用淘汰锰酸锂电池为研究对象, 在研究车用淘汰电池容量和内阻特性的基础上, 分析其梯次利用于电池储能系统可能带来的更严重的电池组一致性问题。结合电池一致性评价方法, 分析了基于电池组容量利用率的均衡判据。针对电池储能系统削峰填谷的应用特点, 提出了以电池组容量利用最大化为目标的在线均衡策略。最后, 设计了电池组充电均衡电路并搭建了电池组均衡测试平台进行实验, 验证了在线均衡系统及控制策略的可行性和可靠性。

关键词: 电池储能; 梯次利用; 锰酸锂; 一致性评价; 在线均衡策略

0 引言

传统能源的日益匮乏和环境的日趋恶化, 极大促进了新能源的发展, 其发电规模也快速攀升^[1]。以风能、太阳能等自然资源为基础的可再生能源发电具有波动性、间歇性和不可准确预测性, 其大规模并网运行会给电网的安全稳定运行带来显著影响^[2]。储能技术被认为可在很大程度上解决新能源发电并网带来的问题, 同时其将贯穿于电力系统发电、输电、配电和用电各个环节, 可以有效缓解高峰负荷供电需求, 提高现有电网设备的利用率和电网的运行效率; 可以有效应对电网故障的发生, 并且提高电能质量和用电效率, 使间歇性和低密度的可再生清洁能源得以更有效的利用^[1]。

对比各种储能技术, 电池储能系统安装灵活、建设周期短, 是现阶段较适合于工程应用的技术。在多种电池储能技术中, 锂电池储能由于具有能量密度高、循环寿命长、效率高等优势, 国内外已有较成功的应用^[2-4]。初始投资高是制约锂离子电池储能在电网中规模化应用的重要因素之一, 而锂离子电池的价格占据了电池储能系统成本的很大部分。随着国内电动汽车的推广和应用, 未来几年将有大批车用动力锂离子电池达到使用寿命而被淘汰^[5]。车用淘汰锂离子电池通过梯次利用于储能系统, 一方面能延长电池使用的全周期寿命, 另一方面也有助于降低电池储能系统的初始成本, 对于推动电池储

能系统在电力系统领域的大规模应用具有重要的意义。

兆瓦级储能电站中, 电池单体数量高达几万节, 需要通过串并联成组来满足储能系统的电压等级和容量需求, 而电池不一致性的存在, 将不可避免导致充放电不均衡现象, 长期运行将大大降低电池储能系统的可靠性和安全性^[3]。目前, 针对这一问题的研究主要集中在储能系统的功率变换系统(PCS)拓扑及其充放电均衡控制策略等方面^[2,6-7], 并未对大容量锂离子电池储能系统内部电池组的均衡控制策略进行深入研究。本文以北京奥运会纯电动大巴车用淘汰锰酸锂电池为研究对象, 在研究梯次利用电池容量和内阻特性的基础上, 结合电池不一致性的评价方法, 分析基于电池组容量利用率的均衡判据。针对电池储能系统削峰填谷的应用特点, 提出以电池组容量利用最大化为目标的主动均衡控制策略, 最后, 设计了电池组充电均衡电路并搭建电池组均衡测试平台进行实验, 验证了本文提出的均衡策略的效果。

1 梯次利用电池容量内阻特性

本文以北京奥运会纯电动大巴车用淘汰锰酸锂电池为测试和研究对象, 选取一整车 10 箱共 104 节电池模块进行电池测试, 电池容量和内阻测试采用美国 Arbin 公司 BTS2000 及其数据采集系统在恒温箱中进行。电池模块为 4 节额定容量为 90 Ah 的锰酸锂电池单体并联而成, 其额定容量为 360 Ah, 且电池容量都已衰退至额定容量 80% 以下, 每箱电池组由 8 个或 16 个模块串联而成(具体电池测试试验描述见附录 A)。由于电池具有初始不一致性, 且电动汽车应用环节电池的串并联方式、位置差异、温

收稿日期: 2013-03-30; 修回日期: 2013-08-05。

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A108); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013YJS087)。

度差异、震动强度以及衰退轨迹等因素各不相同,导致电池参数的衰退速率差异较大,最终加速放大了电池组的不一致性^[8](梯次利用电池模块容量和直流内阻分布特性见附录 B)。

北京奥运会纯电动大巴所用锰酸锂新电池模块容量为 360 Ah,容量极差不大于 10 Ah,1 s 直流内阻为 0.325 mΩ,直流内阻极差不大于 0.05 mΩ。大巴正常运行 3 年后,电池模块容量分布特性见附录 B 图 B1,电池模块容量均值约为 200 Ah,容量衰退约 45%,容量极差为 30 Ah;电池模块 1 s 直流内阻分布特性见附录 B 图 B2,1 s 直流内阻均值为 0.42 mΩ,直流内阻增加约 30%,直流内阻极差为 0.216 mΩ。相对于新电池,梯次利用电池容量和直流内阻一致性明显下降。

将电池模块的容量和直流内阻进行横向比较发现,容量衰退率和直流内阻增加率并无必然相关性。电池模块容量衰退率与直流内阻增加率的散点图如图 1 所示。

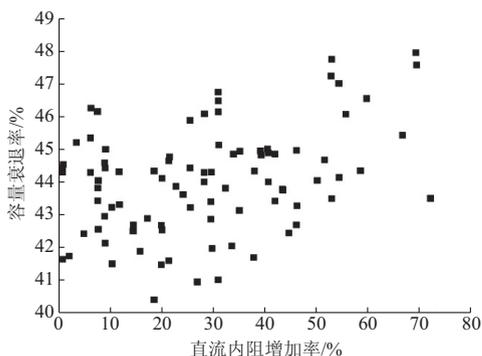


图 1 电池容量衰退率与直流内阻增加率散点图
Fig.1 Scatter plot of battery capacity decay rate with internal resistance increasing rate

在车用淘汰电池梯次利用于储能系统时,需要将电池重新筛选成组。在以电池组的容量和能量利用率为主要性能考核指标时,对电池容量的一致性要求较高,将优先选择容量一致性好的电池成组^[9]。由图 1 结果可知,电池容量衰退率相同的电池,其直流内阻增加率差异较大,选取衰退后容量一致的电池进行成组将不可避免地带来电池内阻较大的初始差异,再加上电池极化和自放电率的不一致性,随着电池的继续使用,电池组的不一致性问题将日渐凸显,电池组容量和能量利用率也将逐渐下降。对于梯次利用锂电池储能系统,高效在线均衡系统的需求更加迫切,然而仅仅对 PCS 进行均衡充放电控制是远远不够的,要想从本质上解决电池储能系统的一致性问題,电池组内的均衡显得更为重要。

2 电池组一致性评价

工程应用较广的是基于外电压的一致性评价方法,但该方法并没有深入分析其内在原因,随着电池组工况的变化,会得到不科学的结论,以此来指导均衡并不能有效解决电池组不一致性问题^[10]。电池组一致性问题对电池组性能影响的最直观表现是电池组的可用容量降低,如果不进行有效均衡维护,长此以往势必会带来电池组输出功率下降和寿命缩短等问题。因此,以电池组最大可用容量作为电池组一致性判断依据,就能实现电池组一致性问题与电池的运行工况和环境之间的解耦,从而有效避免以电池外电压差异来判断电池组一致性好坏而得到不准确结论的问题。

现假设有 n 只最大可用容量分别为 $Q_{\max,1}, Q_{\max,2}, \dots, Q_{\max,n}$,且当前的荷电状态(SOC)分别为 $S_{OC,1}, S_{OC,2}, \dots, S_{OC,n}$ 的电池串联成组,电池组的相关参数如下。

1) 电池组最大放电容量:

$$Q_{dch_max} = \min\{Q_{\max,i}, S_{OC,i}\} \quad (1)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$ 。

2) 电池组最大充电容量:

$$Q_{ch_max} = \min\{Q_{\max,j} (1 - S_{OC,j})\} \quad (2)$$

式中: $j=1, 2, \dots, n$ 。

3) 电池组最大可用容量:

$$Q_{\max} = Q_{dch_max} + Q_{ch_max} \quad (3)$$

当 $i=j$ 时,电池组最大可用容量 Q_{\max} 等于电池组中最大可用容量最小的单体电池 i 的最大可用容量,在这种情况下,如图 2(a)所示,虽然电池组各单体电池之间容量存在差异,但是电池组的容量利用率达到最大化,均衡并不能增加电池组的最大可用容量,所以电池组并不需要均衡。

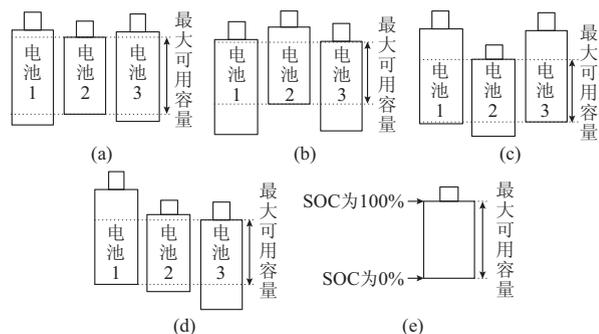


图 2 电池组均衡判断原理
Fig.2 Principle of battery pack balancing

图 2(b), (c), (d) 显示出电池组需要均衡的 3 种可能情况,这 3 种情况的共同点都是 $i \neq j$, 电池

组最大可用容量 Q_{\max} 比组内可用容量最小的电池的最大可用容量还要小。此时,通过均衡能有效增加电池组的最大可用容量。

3 电池组均衡策略

目前,实际应用的在线均衡策略往往采取从简的处理方式,仅以外电压作为控制对象^[11-12]。单纯以外电压来判断均衡与否会出现不稳定结果,同时,均衡前后电池组容量利用率并没有明显增加。由上节分析可知,以电池组容量利用率最大化为均衡目标的关键在于准确识别电池组内各单体电池的 SOC 和最大可用容量。

目前,实际工程应用的在线 SOC 估算方法主要是采用安时计量法与开路电压(OCV)法相结合^[13],电池的 OCV 需要电池静置后获得,静置的时间越长得到的 OCV 越准确。而电池储能系统运行的间歇性为准确获取电池的 OCV 提供了条件。

对于锰酸锂电池并不需要很长时间的静置就能得到较为准确的 OCV,锰酸锂电池充电至不同 SOC 后静置不同时间的电压变化曲线如图 3(a)所示。

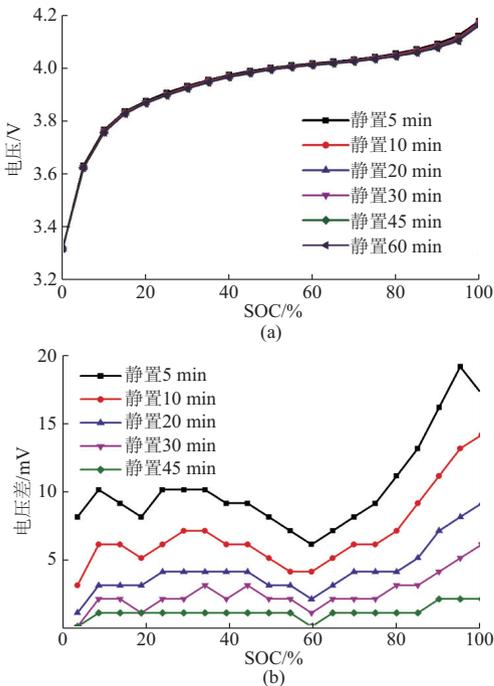


图3 电池充电至不同 SOC 后静置不同时间的电压变化曲线及其相对于 OCV 的电压差曲线
Fig.3 Voltage change curves and voltage difference curves relative to OCV after battery charged to different SOC with different rest time

把电池充电至不同 SOC 且静置 60 min 后的电压曲线当作 OCV-SOC 曲线,电池充电至不同 SOC 后静置不同时间所测电压与电池 OCV 的电压差曲

线如图 3(b)所示。从图中看出,在电池 SOC 中间段电压差异变化平缓,直到电池 SOC 的高端(80%~100%),不同静置时间的电压差异才有增长的趋势。由锰酸锂电池的 OCV-SOC 曲线可知,在 SOC 中间段(10%~80%)每毫伏电压对应的 SOC 变化率小于 0.3%,在 SOC 高端(80%~100%)每毫伏电压对应的 SOC 变化率小于 0.2%。

当用静置 5 min 的电压作为 OCV 估算 SOC 时,在 SOC 中间段带来的误差小于 3%,在 SOC 高端的误差小于 4%。但是,考虑到目前电池管理系统(BMS)的电压检测精度为 5 mV,所以至少选取静置 10 min 的电压去估算电池 SOC 才能保证误差小于 5%。

从电池的 SOC 定义可知,电池的最大可用容量 Q_{\max} 可以通过下式计算^[10]:

$$Q_{\max} = \frac{\Delta Q}{S_{OC, \text{end}} - S_{OC, \text{ini}}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} i_1 dt}{S_{OC, \text{end}} - S_{OC, \text{ini}}} \quad (4)$$

式(4)中, ΔQ 可以在线累积计算(电池电流 i_1 对时间的积分),只要能准确得到电池充放电过程中起始和结束时的荷电状态 $S_{OC, \text{ini}}$ 和 $S_{OC, \text{end}}$,就能实现电池最大可用容量 Q_{\max} 的在线估算。同时,为达到更好的估算精度,一方面,需要起始和结束的荷电状态变化 ΔS_{OC} 尽可能大;另一方面,识别 SOC 时刻应经常性出现,且每次识别时刻应一致。

电池储能系统主要功能之一是实现配电网侧的削峰填谷,以张家口国家风光储输示范工程为例,储能电站有功功率和无功功率一天的变化如图 4 所示。根据电网昼夜负荷峰谷差异大的特点,储能电站于凌晨 00:00—06:00 电网负荷低时满功率(14 MW)充电,于晚间用电高峰时根据实际用电需求进行放电^[3]。因此,针对电池储能系统这一应用特点,选择凌晨充电前和充满电静置 10 min 后的 2 个时刻进行电池最大可用容量的估算,均衡执行也选择充电阶段。

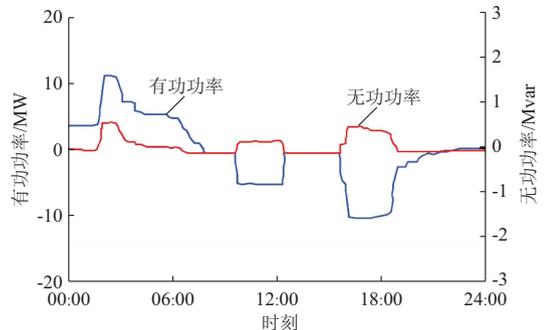


图4 削峰填谷功能示意图
Fig.4 Diagram of load shifting application

电池组均衡是通过对组内单体电池额外充电或放电,使电池组达到如图 2(a)所示情况,从而保证所有单体电池在不过充和不过放情况下电池组的最大可用容量达到最大化。以图 2(b)为例,当电池组充完后,通过估算组内单体电池 SOC 和最大可用容量来判断电池组是否需要均衡。对于图 2(b)的情况,本文采用充电均衡方式,通过额外给电池 2 补充一部分容量使电池组的状态从图 2(b)变成图 2(a)。BMS 计算电池 2 所需的充电容量并存储下来,当下一次充电开始时,BMS 执行均衡策略,电池组充电结束时再次进行均衡判断并重新计算各单体电池所需均衡容量用于下一次均衡策略的执行,如此重复直到电池组满足阈值条件时不再需要均衡。

4 电池组均衡实验验证

4.1 电池组在线均衡系统

根据以往车载 BMS 的开发经验,本文设计了一种适用于大容量电池储能系统的可靠性高且可扩展支持多串联的电池组在线均衡系统。本文采用模块化的设计思路,系统整体框架采用主从结构,由一个电池管理主控制器和多个均衡从控制器组成(均衡系统拓扑结构见附录 C 图 C1)。电池管理主控制器主要功能是收集各个均衡从控制器采集的数据进行均衡与否判断,并下发指令控制均衡从控制器执行均衡,同时完成与电池储能系统其他设备(如 PCS)之间的通信。均衡从控制器主要完成电池箱内电池信息的采集和均衡所需容量的计算与均衡执行功能。

均衡电路作为实现均衡的硬件载体,直接关系到均衡执行的效果。目前均衡电路拓扑形式丰富多样,主要分为耗散式与非耗散式两大类^[10-12]。耗散式主要是指以电阻放电的方式将电池多余的电量消耗以实现均衡的目的,这种方式实现简单、成本低,但存在能量浪费、散热处理和均衡时间长等问题。本文采用非耗散式的充电均衡电路,均衡电路也采用模块化设计,每个均衡从控制器可以根据电池串联数配置均衡电路模块数。

均衡电路模块的拓扑结构如图 5 所示,以 BMS 的 12 V/24 V 电源输入作为各均衡模块的公共直流母线,通过各个模块的 DC/DC 恒流源和开关阵列选通的方式给单体电池进行充电均衡。

其中,切换开关为光控金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET),直接由均衡从控制器的单片机驱动选通。图 5 中节点 ODD 和 EVEN 为经过单体切换开关(CSW)后的输出节点,通过合理的开关

逻辑控制,使得 ODD 到 EVEN 间的电压为需要均衡的单体电池的电压(可能是正电压或负电压)。通过极性切换开关(PSW)阵列的控制,对 ODD 到 EVEN 间电压与恒流源输出侧电压的正负极性进行匹配,保证恒流源能对单体电池进行均衡充电。为了方便均衡容量的计量,同时防止单体电池过充电,恒流源采取恒流限压工作模式,均衡电流大小为 2 A。

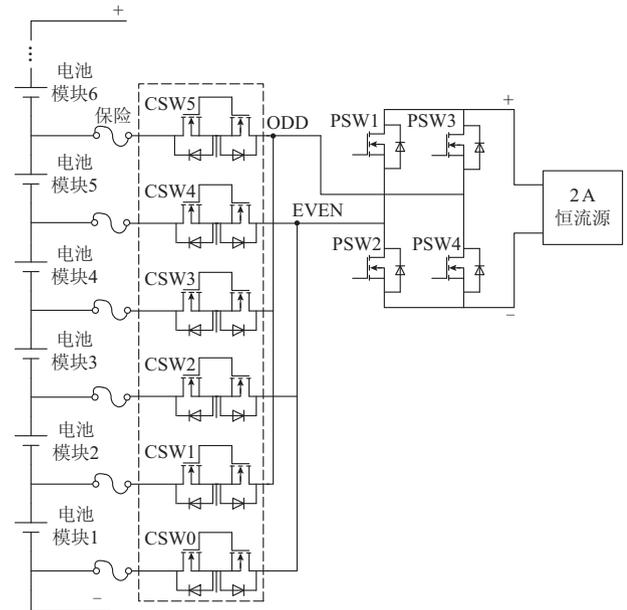


图 5 均衡电路拓扑结构

Fig.5 Equalization circuit topology

电池管理主控制器收集所有从控制器采集的电池单体信息,应用第 3 节提出的均衡策略,对电池组内各单体电池的容量和 SOC 进行估算,应用第 2 节的方法对电池组的一致性进行评价并判断电池组是否需要均衡,同时计算得到各单体电池所需均衡的容量,最后下发相应控制指令的流程图见附录 C 图 C2(a)。在线均衡系统只在电池充电过程对电池进行均衡,如果已经经过一次充电过程并且对电池组进行了均衡容量计算,则在充电开始后,按照计算结果对相应的电池进行均衡处理。同时,在本次充电过程完成并静置 10 min 后,再次对电池组进行均衡判断和所需均衡容量计算用于下次均衡。电池管理从控制器执行均衡的流程图见附录 C 图 C2(b),从控制器接收主控制器的命令执行均衡过程,从控制器各均衡模块确定所需均衡容量最大的电池,以设定的阈值为一个单位完成电池的充电均衡,同时在均衡过程中不断更新存储所需均衡容量。

4.2 电池组均衡效果验证

电池组均衡实验平台如图 6 所示,实验平台主

要由四部分组成:美国 Arbin 公司 EVTS-100 V/400 A 电池组测试设备、北京奥运会纯电动大巴车用淘汰锰酸锂电池组、电池组在线均衡系统以及个人计算机(PC)监控系统。电池组测试设备主要实现电池组充放电循环实验,通过 TCP/IP 将充放电数据上传到 PC 监控系统。被测电池组选取北京奥运会纯电动大巴车用 10 箱电池中第 8 箱 4 并 16 串电池组,该箱电池组各电池模块容量和内阻参数见表 1。电池组在线均衡系统选择一主一从的方式,BMS 均衡板上有 3 个均衡电路模块,其中 2 个模块分别管理 5 节电池,1 个模块管理 6 节电池。

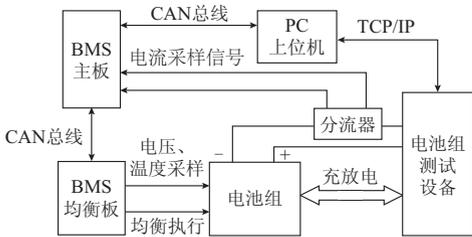


图 6 电池组均衡实验平台

Fig.6 Battery equalization experiment platform

表 1 第 8 箱电池组各电池模块容量内阻参数
Table 1 Battery capacity and internal resistance parameters of battery modules in 8th case

模块编号	容量/Ah	内阻/mΩ	模块编号	容量/Ah	内阻/mΩ
8-1	203.1	0.46	8-9	201.6	0.53
8-2	193.6	0.51	8-10	197.4	0.49
8-3	199.6	0.52	8-11	201.6	0.41
8-4	203.8	0.41	8-12	200.2	0.35
8-5	201.7	0.38	8-13	198.1	0.51
8-6	188.2	0.43	8-14	202.5	0.53
8-7	205.9	0.41	8-15	204.6	0.56
8-8	202.2	0.56	8-16	207.5	0.37

第 8 箱电池组电池模块容量极差为 19.3 Ah,直流内阻极差为 0.19 mΩ,相对于整车电池的容量和内阻分布,其一致性较好。理想情况下,该电池组的最大可用容量为电池模块 8-6 的容量 188.2 Ah。对电池组进行充放电测试,以 1/3C 倍率将电池组恒流充电至单体电池电压达到 4.2 V 后,恒定最高单体电池电压直至充电电流小于 10 A,静置 60 min 后,以 1/3C 倍率恒流放电至最低单体电池电压达到 3 V。电池组充电和静置过程各电池模块的电压变化曲线如图 7 所示。

由于充电前,电池组内各电池模块的 SOC 差异较大,电池模块 8-7 的 SOC 最高,为 19.5%,电池模块 8-13 的 SOC 最低,为 0%。同时,电池本身容量和内阻较大的差异导致充电过程中各模块电池电压出现较大的离散性。电池组充电完成并静置

30 min 后,电池模块 8-9 的电压最高,为 4.135 V,电池模块 8-13 的电压最低,为 4.055 V,电压极差高达 80 mV。电池组以 1/3C 倍率恒流放电的容量为 158 Ah,比电池模块容量最小值还要小,电池组的容量利用率只有 84%。

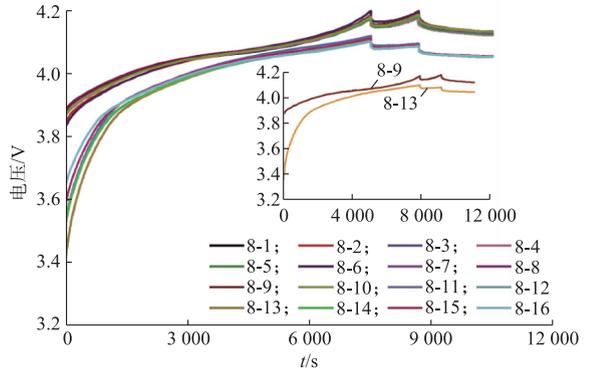


图 7 均衡前电池组充电和静置过程单体电压曲线
Fig.7 Battery voltage curves of charging and rest process before equilibrium

加入在线均衡系统后对电池组进行充放电循环实验,第 80 次循环的电池组恒流、恒压充电和静置过程各电池模块电压变化曲线如图 8 所示。

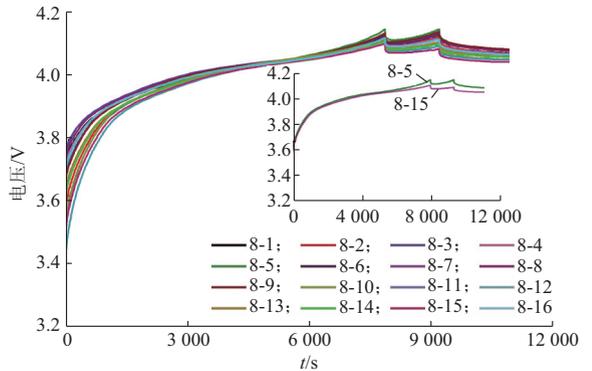


图 8 均衡后电池组充电和静置过程单体电压曲线
Fig.8 Battery voltage curves of charging and rest process after equilibrium

可以看出,电池组均衡效果显著,各电池模块电压一致性明显改善,电池组充电完成并静置 30 min 后,电池模块 8-5 的电压最高为 4.126 V,电池模块 8-15 的电压最低为 4.081 V,电压极差缩小至 45 mV。均衡前后电池组充电和静置过程的电压和 SOC 变化曲线如图 9 所示。

均衡后由于电池组一致性明显改善,电池组充电时间明显变长,电池组充入更多容量,充电完成后整组电池电压也高于均衡前。而充电开始的一段时间,均衡后的电池组电压要低于均衡前,说明均衡后电池组的容量得到更大化的利用,电池组相较于均衡前放出了更多容量。由于电池组的短板效应,一

致性最差的电池将决定电池组的充放电容量,由于均衡后电池组一致性改善,电池组充入更多容量,充电完成后电池组 SOC 也明显提高。电池组以 1/3C 倍率恒流放电,容量增加至 174 Ah,电池组的容量利用率提高了 9%。

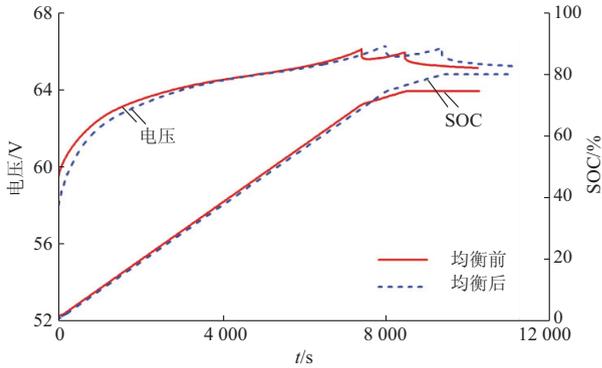


图 9 均衡前后电池组充电及静置过程总电压和 SOC 曲线

Fig.9 Battery total voltage curves of charging and rest process and SOC curves before and after equilibrium

5 结语

锂电池储能系统由于其诸多优势而在电网领域得到较多应用,同时,电动汽车淘汰锂离子电池梯次利用于储能系统将大大降低初始投资成本,为电池储能系统的大规模应用创造了条件。但相比新电池,梯次利用电池更严重的一致性将大大降低电池储能系统的寿命和可靠性。为解决这一问题,仅仅对储能系统 PCS 进行均衡控制是远远不够的。本文对大容量梯次利用锂电池储能系统内部电池组的均衡控制策略进行研究。基于容量利用率评价一致性的方法,分析了以电池组容量利用最大化为目标的电池组均衡判据。针对储能系统削峰填谷的应用特点,提出以电池组容量利用最大化为目标的主动均衡控制策略,设计电池组充电均衡电路并搭建电池组均衡实验平台对均衡效果进行了验证,为进一步完善电池储能系统各支路电池组的组内和组间联合均衡控制建立了研究基础。

附录见本刊网络版 (<http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] 国家电网公司“电网新技术前景研究”项目咨询组. 大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1):3-8.
Consulting Group of State Grid Corporation of China to Prospects of New Technologies in Power Systems. An analysis of prospects for application of large-scale energy storage

technology in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 3-8.

[2] 丁明,陈忠,苏建徽,等. 可再生能源发电中的电池储能系统综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1):19-25.
DING Ming, CHEN Zhong, SU Jianhui, et al. An overview of battery energy storage system for renewable energy generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 19-25.

[3] 高明杰,惠东,高宗和,等. 国家风光储输示范工程介绍及其典型运行模式分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1):59-64.
GAO Mingjie, HUI Dong, GAO Zonghe, et al. Presentation of national wind/photovoltaic/energy storage and transmission demonstration project and analysis of typical operation modes [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 59-64.

[4] TELEKE S, BARAN M E, BHATTACHARYA S, et al. Validation of battery energy storage control for wind farm dispatching[C]// Proceedings of 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, MN, USA.

[5] 张彩萍,姜久春,张维戈,等. 梯次利用锂离子电池电化学阻抗模型及特性参数分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1):54-58.
ZHANG Caiping, JIANG Jiuchun, ZHANG Weige, et al. Characterization of electrochemical impedance equivalent model and parameters for Li-ion batteries echelon use[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 54-58.

[6] DIVYA K C, ØSTERGAARD J. Battery energy storage technology for power systems—an overview[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(4): 511-520.

[7] 金一丁,宋强,刘文华. 大容量链式电池储能系统及其充放电均衡控制[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3):6-11.
JIN Yiding, SONG Qiang, LIU Wenhua. Large scaled cascaded battery energy storage system with charge/discharge balancing [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 6-11.

[8] 王震波,孙逢春,林程. 不一致性对动力电池组使用寿命影响的分析[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(7):577-580.
WANG Zhenpo, SUN Fengchun, LIN Cheng. An analysis on the influence of inconsistencies upon the service life of power battery packs [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(7): 577-580.

[9] 鲁妍. 梯次利用锂离子动力电池特性及仿真研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.

[10] 文锋. 纯电动汽车用锂离子电池组管理技术基础问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.

[11] 吴友宇,梁红. 电动汽车动力电池均衡方法研究[J]. 汽车工程, 2004, 26(4):382-385.
WU Youyu, LIANG Hong. A study on equalization charging for EV traction battery[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(4): 382-385.

[12] LEE Y S, CHENG M W. Intelligent control battery equalization for series connected lithium-ion battery strings[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2005, 52(5): 1297-1307.

(下转第 117 页 continued on page 117)

- [13] 时玮,姜久春,李索宇,等.磷酸铁锂电池 SOC 估算方法研究[J].电子测量与仪器学报,2010,24(8):769-774.
SHI Wei, JIANG Jiuchun, LI Suoyu, et al. Research on SOC estimation for LiFePO_4 Li-ion batteries [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(8): 769-774.

马泽宇(1988—),男,博士研究生,主要研究方向:动力电池成组应用与电池管理技术。E-mail: 11117374@bjtu.

(编辑 万志超)

Design of Equilibrium Strategy of Echelon Use Li-ion Battery Pack for Energy Storage System

MA Zeyu¹, JIANG Jiuchun¹, WEN Feng², ZHENG Linfeng¹, GUO Hongyu¹, SHI Wei¹

- (1. National Active Distribution Network Technology Research Center, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Beijing E-power Electronic Co. Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Based on an analysis of capacity and internal resistance characteristics of the eliminated lithium manganese batteries for the Beijing Olympic Games pure electric bus, more serious battery pack consistency issues due to battery echelon use are discussed in detail. With reference to the battery consistency evaluation method, the battery equilibrium criterion is analyzed based on capacity utilization of the battery pack. And in light of the load shift application of battery energy storage system, an online equilibrium strategy for maximizing the capacity utilization is proposed. The battery pack charging equalization circuit and equalization test platform are built prior to testing and verifying the feasibility and reliability of the online equalization system and its control strategy.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A108) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2013YJS087).

Key words: battery energy storage; echelon use; lithium manganese; consistency evaluation; online equalization strategy

edu.cn

姜久春(1973—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:电动汽车充电站技术、电力电子技术和动力电池管理技术。E-mail: jcjiang@bjtu.edu.cn

文 锋(1980—),男,博士,主要研究方向:动力电池成组应用与电池管理技术。E-mail: 05117295@bjtu.edu.cn