

大容量储能系统电池管理系统均衡技术研究

胡轲

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 电池组一致性问题是大容量电池储能系统的重要问题, 电池管理系统的均衡技术是解决这一问题的有效方法。对大容量储能系统中电池管理系统均衡技术进行了研究, 分别介绍和探讨了电池模块内均衡技术、模块间均衡技术, 以及电池系统中相内和相间均衡策略, 并阐述了四级均衡体系的构建与实现。通过电池系统四级均衡体系的应用, 实现了电池系统内不同层级的有效动态均衡, 为更大容量的电池系统的长寿命和有效利用提供了技术支持。

关键词: 大容量储能; 电池管理系统; 均衡

中图分类号: TM76

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)01-0040-05

Research on Balancing Technology of Battery Management System of High-capacity Energy Storage System

HU Ke

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: The consistency of battery pack is a critical problem of high-capacity battery energy storage system. The balancing technology of battery management system is an effective solution to this problem. This paper made research on battery management system balancing technology of high-capacity energy storage system. Balancing technologies within the battery module, between the modules, within the phase and between the phases of battery system were introduced and discussed. The construction and realisation of 4-level balancing system were described. Through the application of 4-level balancing system of battery system, the effective dynamic balance of different levels of battery system was achieved, which has provided technical support for the long-life and effective utilisation of higher capacity battery system.

Key words: high-capacity energy storage; battery management system; balancing

智能电网和能源互联网的发展对电力系统各个环节提出了新的技术要求。经济的快速发展, 导致电网负荷的快速增长, 峰谷差日益扩大; 同时, 风能、太阳能等新能源大量接入对电网调峰和系统安全带来一定的影响。储能技术作为电网新的调节手段, 可作用于电网各个环节。储能在电网侧能削峰填谷, 提高电网设备的综合利用率; 在发电侧可解决新能源并网问题^[1]。

在储能技术领域中, 电池一致性问题一直是困扰电池串并联成组使用的技术难题。虽然通常在电

池成组前会进行性能一致性匹配, 但电池单体间微小的内部性能差异会随着充放电运行而不断累积, 并明显地体现为电池系统一致性变差、电池系统充放电性能劣化、电池系统可用容量大幅衰减等缺陷^[2]。

为了尽可能减小不一致性对电池系统的影响, 需通过外部技术手段对电池进行均衡维护。电池管理系统的均衡技术是解决大容量电池组一致性问题的有效方法, 它能够提高成组电池一致性, 缓解电池“短板效应”引起的电池系统性能劣化问题^[3]。对于大容量电池组, 可通过设置 BMU(电池管理单元)-BCMS(电池簇管理系统)-BAMS(电池阵列管理系统)三层电池管理系统, 对电池模块内、电池模块间和电池系统相内、相间的能量进行均衡, 以

提高电池一致性, 延缓电池堆使用容量衰减, 从而提高电池容量利用率。

1 电池模块内均衡技术研究

1.1 模块内均衡装置设计

电池模块内均衡由 BMU 采用一种基于隔离型的 MOS 开关切换来实现。具体通过一个 DC/DC (直流/直流变换) 单元生成一路隔离的可对单体电池进行充放电的直流电源(简称 DC 电源)。在电池组充电过程中, 如果单电池间的差异增大, 即选定电量最低的电池(记为电池 B), 通过 MOS 开关将 DC 电源切换至电池 B 的两端, 从而使得该电池的充电电流大于其他电池, 确保电量低的电池能补充更多的电能, 延长充电时间, 增加充入电池组的电量; 在电池组放电过程中, 如果单电池间的差异增大, 即选定电量最低的电池(记为电池 B), 通过 MOS 开关将 DC 电源切换至电池 B 的两端, 对 B 电池进行补电, 从而使得该电池的放电电流小于其他电池, 确保其它电量高的电池能放出更多的电能, 延长放电时间, 增加电池组放电量。多个 MOS 开关间的切换始终使得在充电过程中, 最低电量电池的充电电流大于其它电池, 在放电过程中, 最低电池的放电电流小于其它电池。最终结果是电池组内单体电池保持很好的均衡性, 其原理图如图 1 所示。

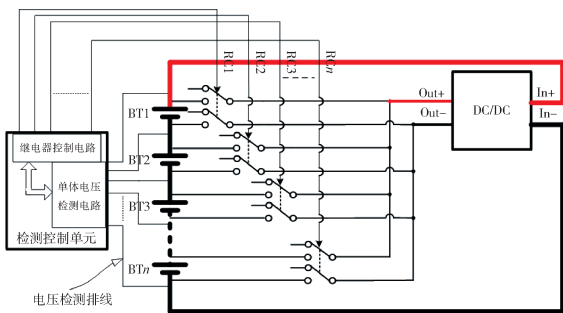


图 1 DC/DC 式主动均衡电路

Fig. 1 DC/DC type active balancing circuit

1.2 模块内均衡控制实现

DC/DC 主动均衡方案可实现在电池运行全电压区间进行均衡。由于锂电池充放电电压特性曲线上有一个电压平台区, 在平台区内电池电压随充放电变化不明显, 超出平台区以后, 电池电压迅速变化。电池模块内均衡策略是基于电池电压特性曲线以电压阈值制定。

在电池组充电过程中, BMU 内的微控制单元 MCU 根据采集电池模块内的单体电压信息, 选出最高单体电压记为 V_{\max} 和最低电压记为 V_{\min} , 计算出电池模块内单体电压的平均值 V_{avg} , β 为均衡开启阈值, 若 $V_{\max} - V_{\text{avg}} > \beta$, 则将电压最高的单体电池能量释放给串联电池组或者电压最低的单体, 直到 $V_{\max} - V_{\text{avg}} \leq \beta$, 则均衡终止。

在电池组放电过程中, BMU 电池管理单元的 MCU 根据采集电池模块内的单体电压信息, 选出最高单体电压记为 V_{\max} 和最低电压记为 V_{\min} , 计算出电池模块内单体电压的平均值 V_{avg} , β 为均衡开启阈值, 若 $V_{\text{avg}} - V_{\min} > \beta$, 则将电池模块能量释放给电压最低的单体, 直到 $V_{\text{avg}} - V_{\min} \leq \beta$, 则均衡终止。

BMU 电池管理单元采用了 DC/DC 型主动均衡方案。它是基于电池模块内的所有单体的能量状态进行综合评估, 能量转移不再只限于相邻电池, 可以进行电池模块总能量向荷电量较低电池转移, 且可多路同时进行, 实现智能平衡。

2 电池模块间均衡技术研究

2.1 电池模块间均衡方案设计

电池模块间均衡采用交流功率母线拓扑结构实现电池模块之间的能量均衡, 如图 2 所示。将多台均衡器的交流输出并联到同一个公共母线上, 达到共用交流侧传输功率的目的。

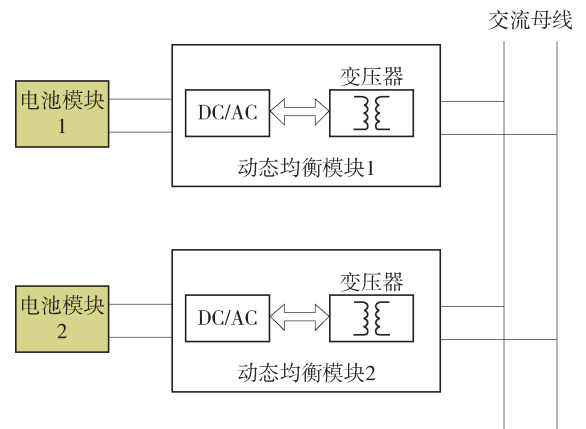


图 2 带交流母线的 DC/AC 均衡示意图

Fig. 2 Indicative drawing of DC/AC balancing with an AC busbar

当电池簇中出现电压偏高和偏低的电池模块时, 通过控制通断其对应的 DC/AC 逆变器模块,

将电压值偏高的直流电压经逆变成交流方波到公共交流母线上,而对于电压值偏低的电池模块来说,其连接均衡器接收从交流母线上来的交流方波,并工作在同步整流状态,从而完成调节高电压电池模块向低电压电池模块传输多余能量的均衡过程^[4]。

此方案有多个优点:(1)并联条件。利用与多逆变电源并联运行的类似机制,各个模块的输出交流频率、相位一致,而幅值由各自的电池电压决定;(2)功率方向。本方案并不要求所有并联的模块统一向负载输出功率,恰相反,这里利用的是相互模块间的压差造成的环流进行均衡;(3)控制器。均衡模块由专有均衡控制器进行控制,原始控制信号来源于 BCMS,由 BCMS 完成电池模块电压、SOC 的监测,均衡策略的运行,均衡器的投入和切除,而功率流向由电池压差自行决定,不受 BCMS 和均衡控制器控制;(4)硬件控制。均衡器内部为全硬件控制,没有采用单片机或 DSP 等芯片,可靠性高;(5)信号同步。各均衡器的交流侧采用相同频率、相位的方波,利用通信线实现同步工作。均衡模块采用推挽双向 DC/AC 拓扑图,如图 3 所示:

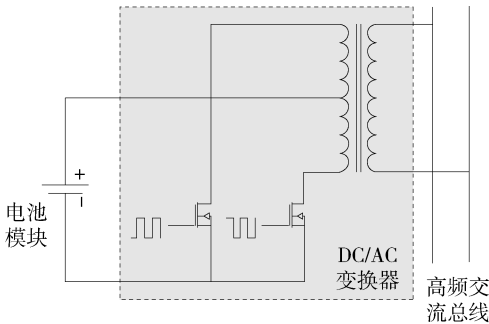


图3 推挽式 DC/AC 均衡模块原理图

Fig. 3 Schematic diagram of push-pull type DC/AC balancing module

2.2 电池模块间均衡控制模式

为保证均衡环流只与电池电压有关,并考虑到同步协调工作,这里假设各均衡器模块工作频率 f 、相位 φ 都完全相等。以4个均衡器模块为例,电池模块经均衡器逆变后的方波等效为方波电压源 $U_1 \sim U_4$,电池内阻和线路阻抗等效为 Z ,简化电路图如图4所示。

方波电压经傅里叶变换后,可得不同奇次正弦波分量,以正弦基波为例进行分析。叠加定理,可得各均衡模块输出的基波电流为:

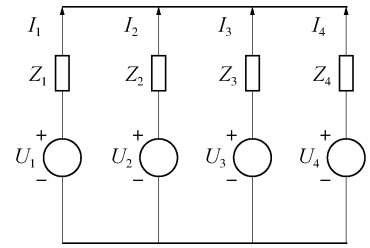


图4 四模块同步运行的简化电路

Fig. 4 Simplified circuit of 4 modules synchronously operation

$$I_1 = \frac{1}{Z_1 Z_2 Z_3 + Z_1 Z_2 Z_4 + Z_2 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_3 Z_4} \times \left[U_1 (Z_1 Z_3 + Z_2 Z_4 + Z_3 Z_4) - U_2 (Z_3 Z_4) - U_3 (Z_2 Z_4) - U_4 (Z_2 Z_3) \right] \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{1}{Z_1 Z_2 Z_3 + Z_1 Z_2 Z_4 + Z_2 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_3 Z_4} \times \left[U_2 (Z_1 Z_3 + Z_1 Z_4 + Z_3 Z_4) - U_1 (Z_3 Z_4) - U_3 (Z_1 Z_4) - U_4 (Z_1 Z_3) \right] \quad (2)$$

$$I_3 = \frac{1}{Z_1 Z_2 Z_3 + Z_1 Z_2 Z_4 + Z_2 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_3 Z_4} \times \left[U_3 (Z_1 Z_2 + Z_1 Z_4 + Z_2 Z_4) - U_1 (Z_2 Z_4) - U_2 (Z_1 Z_4) - U_4 (Z_1 Z_2) \right] \quad (3)$$

$$I_4 = \frac{1}{Z_1 Z_2 Z_3 + Z_1 Z_2 Z_4 + Z_2 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_3 Z_4} \times \left[U_4 (Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3) - U_1 (Z_2 Z_3) - U_2 (Z_1 Z_3) - U_3 (Z_1 Z_2) \right] \quad (4)$$

在各均衡器电路的一致性较好的情况下,假设各电池模块的内阻和线路阻抗相等,即 $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4 = Z$,那么可得到如下简化公式:

$$I_1 = \frac{1}{4Z} (3U_1 - U_2 - U_3 - U_4) \quad (5)$$

$$I_2 = \frac{1}{4Z} (3U_2 - U_1 - U_3 - U_4) \quad (6)$$

$$I_3 = \frac{1}{4Z} (3U_3 - U_2 - U_1 - U_4) \quad (7)$$

$$I_4 = \frac{1}{4Z} (3U_4 - U_1 - U_2 - U_3) \quad (8)$$

由上述公式可看出,基波电流的方向只与基波电压差值的正负有关。当 $3U_1 - U_2 - U_3 - U_4 > 0$, I_1 为正值,表明1号电池向外输出功率,处于均衡放电状态;当 $3U_1 - U_2 - U_3 - U_4 < 0$, I_1 为负值,表明1号电池接收其它电池传来的功率,处于均衡充电状态;当 $3U_1 - U_2 - U_3 - U_4 = 0$ 时,电池达到

理想均衡状态。同理可分析得到：其它次谐波也与基波相似，其电流方向也只与谐波电压差有关，且相位与基波一致，只是在电流幅值大小上比例系数各不相同。经合成后得到的方波电流方向仍满足以上公式，推广后得到 n 个均衡模块同步运行时，第 k 个电池模块对应的均衡器电流可表达为：

$$I_k = \frac{1}{nZ} [(n-1)U_k - U_1 - U_2 \cdots - U_{k-1} - U_{k+1} \cdots - U_n] \quad (9)$$

多模块同步运行时，各均衡器必须满足工作频率、相位一致的运行条件，均衡电流根据电池电压差自动调节其方向为充电还是放电，最终达到均衡状态。均衡控制器与 BCMS 协调工作，通过设置电压差阈值来启动或停止均衡器模块工作，可控制实现 2 台并联运行（如最高电压和最低电压的电池）或数台并联运行，对容量扩展和控制策略改变非常方便。

3 四级均衡体系的形成与实施

3.1 电池系统相内相间均衡策略

除上节叙述的电池模块内、模块间均衡外，电池储能系统还具有相内、相间均衡，由 BAMS 控制能量转换系统 PCS 来实现。

储能系统各相内电池簇之间的均衡由 BAMS 控制。电池簇均衡控制策略在 BAMS 软件中运行，BAMS 依据制定的电池簇均衡控制策略，判断是否需要启动或停止电池簇间均衡，由此生成电池簇均衡启停开关信号发送至 PCS，再由 PCS 具体实现相内均衡。PCS 收到 BAMS 发出的均衡启动信号后，在充放电时自动调节各电池簇的电流，形成不同簇之间的电流差异，从而实现均衡。

储能系统各相间的均衡也由 PCS 具体实现。在充放电时 PCS 自动调整系统 A、B、C 三相的电池簇电流，形成不同电池相之间的电流差异，从而实现均衡。BAMS 依据制定的电池相均衡控制策略，判断是否需要开启或退出相间均衡，由此生成电池相均衡启停开关信号发送至 PCS^[5-6]。

3.2 四级均衡体系构建与实现

电池管理系统分层分级设计，BMU 负责管理一个电池模块内的各电池单体，BCMS 负责管理一个电池簇的各电池模块，BAMS 与各 BCMS 通信，监测管理整个电池系统全部数据信息，并负

责与 PCS 和监控系统通信，构成 BMU-BCMS-BAMS 多层次大容量电池管理系统，系统结构如图 5 所示。

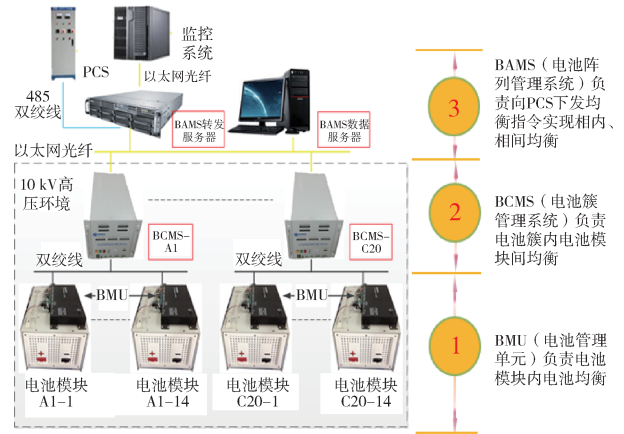


图 5 三层次电池管理系统

Fig. 5 3-Layer battery management system

在三层次电池管理系统的基础上，BMU 控制的电池模块内均衡、BCMS 控制的电池模块间均衡、BAMS 控制的电池系统相内以及相间均衡，由此构建了大容量储能电池系统的四级均衡体系。该体系根据电池系统的结构和管理系统的功能分层级地对电池实施均衡控制。BMU 将电池模块内各单体电池调整一致，BCMS 控制均衡模块完成同一电池簇内各个模块间的均衡，BAMS 运行均衡策略并向 PCS 下发均衡指令实现电池系统的相内相间均衡，如图 6 所示。

4 结论

综上所述，电池堆四级均衡系统具有以下特点：

1) 多层次。模块—模块均衡方式实现电池模块间的能量转移，既能减少能量浪费，又不依赖外部能量的输入，实现模块间的能量均衡。

2) 大电流。各级均衡子系统的最大均衡电流都达到 5A 或 5A 以上，与传统的均衡电路仅实现 1~2A 的均衡电流有所区别。大电流均衡能够缩短均衡时间，提高电池堆的瞬时最大可用功率。

3) 高效率。大电流均衡的实现要求均衡电路具有较高的功率转换效率。四级均衡结构的各子均衡系统的均衡效率均高于 90%。高效率不仅提高了能量的利用率，而且减少发热功率，增加均衡电流。

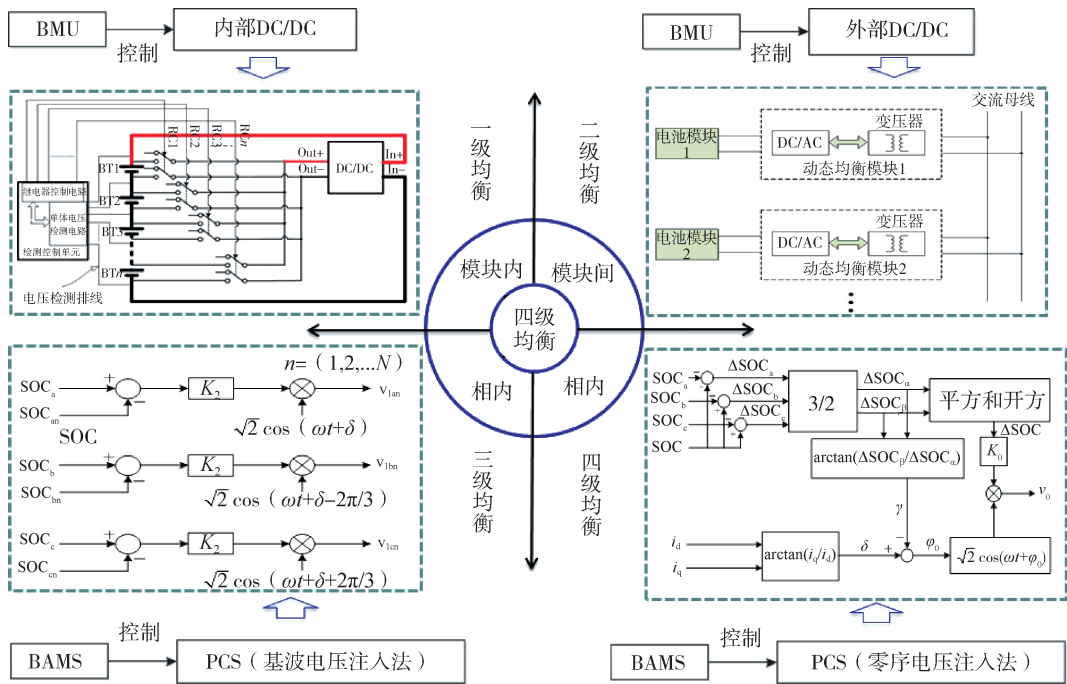


图6 四级均衡体系

Fig. 6 4-Level balancing system

4) 集中调控。四级均衡由 BAMS 统一控制，BAMS 给 PCS 发送电池簇均衡与电池相均衡的控制命令，BAMS 下发单体均衡与模块均衡的控制命令至 BCMS，BCMS 控制模块均衡的同时将单体均衡指令下发 BMU，由 BMU 控制单体均衡。多层次电池系统中，底层电池的不均衡性将影响上层电池系统的不均衡性^[7]。集中调控的优点在于电池管理系统对电池堆各层级的不均衡程度分别进行评估，解耦层级间的影响因素，生成各层次的均衡控制指令，快速精准地完成均衡。

基于多层次电池管理系统，提出了储能系统电池模块内、模块间和相内、相间四级分层均衡策略，构建了储能电池系统的四级均衡体系，实现了电池系统内不同层级电池单体间的动态均衡，为更大容量的电池系统的长寿命和有效利用提供了技术支持。

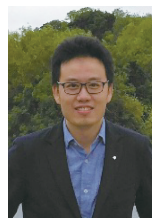
参考文献：

[1] 王科, 陆志刚, 陈满, 等. 深圳宝清电池储能电站监控系统集成设计与实现 [J]. 机电信息, 2014(6): 115-116.
 [2] YANG D M, QI G G, LU C. An improved electric model with online parameters correction for large Li-ion battery packs [J].

International Journal of Computer and Electrical Engineering, 2013, 5(3): 330-333.

[3] ZHANG B H, LU Z G, CHEN M. A high efficiency DC/AC inverter for energy balancing of battery modules [J]. Industrial Electronics & Applications, 2014; 1609-1614.
 [4] 毛苏闽, 蔡旭. 大容量链式电池储能功率调节系统控制策略 [J]. 电网技术, 2012, 36(9): 226-231.
 [5] 彭思敏, 高孝天, 蔡旭, 等. 并联型蓄电池系统的等效电路建模 [J]. 电力电子技术, 2013, 47(1): 39-40.
 [6] 陈建斌, 胡玉峰, 吴小辰. 储能技术在南方电网的应用前景分析 [J]. 南方电网技术, 2010, 4(6): 32-36.
 [7] 董晓文, 何维国, 蒋心泽, 等. 电力电池储能系统应用与展望 [J]. 供用电, 2011, 28(1): 5-7.

作者简介：



胡轲(通信作者)
 1988-，男，四川双流人，工程师，硕士，主要从事变电设计及研究工作 (e-mail) huke@gedi.com.cn。

HU K