

# 锂离子电池组不一致性控制的研究进展

宋文吉, 吕 杰, 罗 卫, 冯自平

( 中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东 广州 510640 )

**摘要:** 总结电池均衡、成组方式和热管理的研究方法及问题。电池均衡技术主要有电池均衡电路、电池均衡控制策略; 电池成组方式主要有电池串并联方式、电池连接阻抗; 电池热管理主要有电池生热特性、电池散热结构和电池组热管理等。

**关键词:** 锂离子电池组; 电池均衡; 电池成组方式; 电池热管理

**中图分类号:** TM912.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1579(2017)05-0303-04

## Research progress in Li-ion battery pack inconsistency control

SONG Wen-ji, LV Jie, LUO Wei, FENG Zi-ping

( *Guangdong Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China* )

**Abstract:** The research methods and problems of battery equalization, battery connection mode and battery thermal management were summarized. The battery equalization consisted of battery equalization circuit and battery equalization control strategy. The battery connection mode was composed of battery series-parallel connection and battery connection impedance. The battery thermal management was composed of battery heating, battery cooling and battery thermal management.

**Key words:** Li-ion battery pack; battery equalization; battery connection mode; battery thermal management

锂离子电池串并联成组,有助于获得较大的储能容量及较高的功率输出,但使用过程中受充放电模式、运行环境、自身结构及化学特性等因素影响,易导致单体电池出现性能差异<sup>[1]</sup>,主要表现为电池内阻、电压和容量的不一致,造成电池组欠充电、过充电和过放电,严重影响电池寿命,并造成安全隐患<sup>[2]</sup>。

锂离子电池体系由电池、电池管理系统(BMS)、电池均衡系统和电池热管理系统等模块组成,电池的串并联方式、连接阻抗、连接位置、均衡控制策略、电池热管理方式、环境温度及充放电策略等,均会影响电池的一致性。

优化电池外电路结构、参数和控制策略,实现电池组使用寿命最大化和使用成本最小化,已成为规模储能领域迫切需要解决的问题。目前,相关研究多侧重于监测单体电池间

容量和性能差异,由于缺乏对差异产生机制的系统分析,调控效果差强人意。本文作者从电池均衡技术、电池成组方式和电池热管理等3个方面阐述电池不一致性控制方法的研究现状,并对发展趋势进行展望。

### 1 电池均衡技术

电池均衡利用外部电路和控制方法实现电池间状态和能量的平衡,可以缩小电池之间容量和性能的差异,有利于提高储能系统安全性、能效和经济性<sup>[2]</sup>。近年来,国内外针对均衡电路及其控制策略展开了相关研究。

#### 1.1 电池均衡电路

均衡电路分为被动式均衡、主动式均衡和混合式均衡。被动均衡通过在电池两端并联电阻,以热能形式消耗多余的

#### 作者简介:

宋文吉(1978-),男,山东人,中国科学院广州能源研究所研究室副主任,研究员,博士,研究方向:大规模储能系统;

吕 杰(1984-),女,河南人,中国科学院广州能源研究所助理研究员,硕士,研究方向:大规模储能系统,本文联系人;

罗 卫(1992-),男,湖南人,中国科学院广州能源研究所硕士生,研究方向:储电系统电池均衡技术;

冯自平(1968-),男,宁夏人,中国科学院广州能源研究所研究室主任,研究员,博士生导师,博士,研究方向:先进储能。

**基金项目:** 广东省科技重大专项(2014B010128001),中国科学院可再生能源重点实验室基金项目(Y607j31001),广东省质量技术监督局科技项目(2015CZ11)

电量,电路简单、容易实现,通常用于电池组充电过程<sup>[3]</sup>,但在均衡过程中会产生大量的热,增加电池热管理的难度,并造成能量浪费<sup>[1]</sup>。主动式均衡采用能量转移的方式实现电池电量的平衡,又分为均衡能量在电池组内部流动和由外部电源补充能量等两种方式。主动式均衡能量转换效率较高,电路结构更复杂<sup>[3]</sup>。串联电池组主动均衡电路结构主要包括:将开关电容、功率电感作为能量转移载体,完成相邻电池之间的能量传递,实现能量双向流动;借助多输出绕组变压器平衡电池之间的电量;采用反激变换器、降压(Buck)-升压(Boost)变换器、Cuk变换器、直流(DC)/DC双向隔离变换器等实现电池之间的均衡。采用准谐振电感电容(LC)变换器和升压DC/DC变换器实现电池之间的能量均衡,可提高均衡速度和电池组可用容量<sup>[4]</sup>。准谐振LC变换器有助于获得零电流开关,降低开关损耗,提升均衡模块效率。升压DC/DC变换器有利于获得较大的均衡电流(0.86 A),均衡速度亦较快,电池可用容量提升约11.29%<sup>[4]</sup>。混合式均衡结合能量转移均衡和能量消耗均衡方式,实验表明,单体电池之间最大荷电状态差异由10.42%降低为4.51%,可改善电池之间的一致性,提高电池组的充放电能力<sup>[3]</sup>。采用脉宽调制(PWM)控制方式,通过控制均衡模块占空比,调节均衡电流和均衡时间。均衡电流可达到1.378 A,电池组能量转换效率提升约7.7%,电池组可用容量增加8.95%。各单体电池可同时均衡,提高速度、缩短时间<sup>[3]</sup>。

### 1.2 电池均衡控制策略

均衡控制策略的研究主要集中在电池不一致性的判别及均衡电流控制等方面。通常将电池没有能量流动状态时,正、负极之间的开路电压作为判断依据,但不能在充放电状态下测量开路电压<sup>[5]</sup>。采用电池工作电压判断性能差异的方法容易实现,但锂离子电池存在平台电压区,工作电压不能真实反映电池的容量状态。通过荷电状态(SOC)判断电池的不一致性,受SOC估算精度的影响<sup>[6]</sup>。对于均衡控制方法的研究,通常采用模糊控制法和遗传算法等实现对均衡电流的控制,提高能量转换效率,缩短均衡时间<sup>[4]</sup>。采用基于自适应神经模糊推断系统的串联电池组动态均衡控制方法,将神经网络与模糊逻辑结合,根据动态均衡和系统状态,调整均衡器场效应管的占空比,获得最佳均衡电流<sup>[7]</sup>。该方法的能量转换效率可达93.1%,比平均差均衡算法高5.2%,均衡时间比平均差均衡算法减少3.98%,对电池不一致性的改善作用更显著。基于两级DC/DC变换器的自适应遗传算法与模糊逻辑算法相比,能量损失降低1.51%,均衡时间缩短16.29%,电池均衡性提升30.77%<sup>[1,6]</sup>。

现阶段研究多聚焦于均衡硬件电路设计与实现,以及如何提高均衡系统的效率和均衡速度<sup>[1]</sup>。不仅均衡电路参数影响均衡效果,而且均衡启动时电池的SOC差异、均衡阈值、充放电电流大小、均衡电流与充放电电流比值( $\beta$ ),以及充放电工况等不同时,电池间的容量差异变化率 $\alpha$ (电池间最大容量差在充放电前后的变化值与电池额定容量的比值)也不同<sup>[8]</sup>,即电池均衡效果不同。

目前,国内外有关均衡参数对电池不一致性改善作用的

影响机理研究得较少,而均衡参数对均衡系统的高效运行至关重要。放电均衡效果通常优于充电均衡,低倍率充放电的均衡效果优于高倍率,电池SOC差异大时,均衡效果较为显著<sup>[8]</sup>。如何根据均衡拓扑结构和均衡控制电路,寻找均衡启动时刻、均衡电流与充放电电流比例范围、均衡阈值等,获得较为理想的均衡参数优化设计原则和方法,并获得最佳均衡电流算法,减小电池间容量差异,进而提高电池体系性能,有待深入研究。

## 2 电池成组方式

### 2.1 电池串并联方式

电池之间和模块之间通过连接电路和控制元件,以串并联方式连接。通常将多个电芯并联组成电池模块,以满足容量要求,再将多个电池模块串联,满足电压要求。电池连接件通常采用铜网和铜镍合金制成,阻值不同,而元器件的性能和老化速度存在偏差,连接点消耗的能量不同,对电池组的影响不同,易造成电池体系的不一致<sup>[9]</sup>。个别偏高的电池连接阻抗会导致电流在电池组内不均匀流动,造成电池工作状态不均匀。随着时间的延续,电流的不均匀流动将造成电池SOC、开路电压等出现差异。即使在负载断开的情况下,电池之间仍有能量流动,导致部分电池的老化更快。

### 2.2 电池连接阻抗

在单体电池模型基础上,模拟分析单体电池之间连接件的阻值、BMS中电池电压采样电路输入阻抗对SOC差异的影响,可以发现:连接件阻值导致极柱到各单体电池支路的阻值不同,流经各单体电池的电流不同,远离极柱的单体电池因连接件较长、阻值较大,电流较小<sup>[9-10]</sup>。放电末期,与电池极柱相连的单体电池,平台期放电电流较大,率先进入放电末期,此电池电压和SOC始终低于其他电池,并更容易进入深度放电状态,老化更快<sup>[9-10]</sup>。该单体电池的率先老化,会导致相邻电池出现过放电,造成安全隐患;同时,连接件阻值的增加,将进一步扩大单体电池之间的SOC偏差,需尽量降低连接件阻抗,调整电池极柱到各单体电池连接件的阻值尽量一致<sup>[9-10]</sup>。

可根据电池欧姆内阻匹配连接件的阻值,当放电电流为0.5 C,在2只电池并联的情况下,连接件阻值与电池欧姆内阻比值不能超过10%,而当电池并联数量增加到8只时,此比值应下降到1%以下,并将极柱安置在中心位置<sup>[9-10]</sup>。BMS电压采样电路输入阻抗到电路板的通路的存在,导致采样线路上存在外载漏电流。当电压采样电路输入阻抗为兆欧级时,外载漏电流仍达到10  $\mu$ A左右,因此,需要提高电压采样电路的输入阻抗<sup>[9-10]</sup>。

目前的研究,通常以电池某一SOC下的欧姆内阻和极化内阻建立电池等效模型,然后分析电池集成方式、极柱连接位置和连接阻抗对成组后单体电池间容量差异的影响。锂离子电池的内阻随着电池SOC和循环次数的变化而改变,SOC的变化将引起电解液导电能力及 $\text{Li}^+$ 浓度的变化。在一个循环周期内,当SOC低于20%时,内阻较大。在充电过程中,SOC增加,电池内阻先迅速下降,再趋于平缓<sup>[11]</sup>。随着

电池充放电循环次数的累积,以磷酸铁锂( $\text{LiFePO}_4$ )锂离子电池为例,电化学反应会造成负极表面的固体电解质相界面(SEI)增加,进而导致电池内阻增加和容量衰减<sup>[8]</sup>。随着每个循环周期内电池内阻的改变及整个使用过程中电池内阻的增加,欧姆内阻与连接件阻值的比例不断改变<sup>[9-10]</sup>。为了提高电池体系的安全性和稳定性,必须分析单体电池整个使用过程中内阻的变化规律,结合BMS电压采样电路的输入阻抗误差,研究包含串并联方式、极柱连接位置和连接件阻抗在内的集成方式对成组电池不一致性的影响机制。

### 3 电池热管理

锂离子电池在快速充放电的过程中会产生大量的热量。如果散热不及时,会导致电池的温度过高,并造成温度分布不均衡。

#### 3.1 电池生热特性

充放电电流、环境温度等因素对电池产热有较大的影响,充放电倍率、电压平台和外部散热条件均影响电池的热量生成及温度变化;而产生的热量反过来又会影响电池内部电学和热学参数,导致不同工况下电池温度场分布和电压分布呈现较大的差异性,造成单体电池的性能差异。对电池生热特性的研究主要基于电化学-热耦合模型以及电-热耦合模型。电化学-热耦合模型将微观粒子行为作为电池生热的计算依据,根据电荷守恒、组分守恒和能量守恒基本定律,预测电池在正常工作状态下的温度分布<sup>[12]</sup>。电化学-热耦合模型以内部微观机理为基础,对电池内电阻热进行描述,根据电池内部电流分布不均的情况,分析欧姆电阻热对局部位置的依赖性,从电-热耦合传输的角度研究电池热特性<sup>[13]</sup>。电-热耦合模型多把电池作为均匀热源,忽略温度不均匀的影响,在一定程度上影响了参数预测的准确性<sup>[14]</sup>。

#### 3.2 电池散热结构

在电池组散热结构方面,主要通过模拟单体电池各部分的发热量和表面温度分布,获得电池组散热结构。针对电池散热结构的研究,主要是冷却介质的流通方式、冷却介质进出口设置和单体电池的排列方式<sup>[15]</sup>。运用正交实验法对软包装电池组的风冷结构参数进行优化,研究电池组间距递减幅度、上下集流板倾斜角度等参数对电池组温度场、流场及进出口压差的影响,发现电池组间距递减幅度的增大,有利于抑制电池组的温升,同时,可提高温度均匀性,有利于降低进出口压差<sup>[2]</sup>。

#### 3.3 电池组热管理

在电池组热管理方面的研究主要围绕空气、液体、相变材料和热管冷却,以及电池组预热。空气冷却系统结构简单、便于维护、应用广泛,但冷却效果较差。周期为120 s的往复式空气冷却系统,可使电池组的最大温差下降 $4.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,最高温度下降 $1.5\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[15]</sup>。液体冷却对提升电池组温度场一致性效果显著,系统体积小,但能耗较大、密封要求高。在42110型电池周围布置4个微型液体冷却通道,当管道内的冷却液以 $1\text{ g/s}$ 的速度流动时,可将电池温度控制在 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 以内<sup>[15]</sup>。用相变材料对电池进行热管理,结构简单,相变潜热

大,温度波动较小,但该方法属于被动冷却,需结合强制风冷,以保证电池组热管理效果的持续有效<sup>[16]</sup>。向相变材料石蜡中添加碳纤维,可提高导热性能,当碳纤维的长度为 $2\text{ mm}$ 、质量分数为 $0.46\%$ 时,电池组的最高温升下降了 $45\%$ <sup>[15]</sup>。在电池组预热方面,外部加热系统结构简单,但速度较慢;电池组安装加热板较简单,但耗时较长,电池组内温度不均匀,且能耗较大;用加热套预热时,电池受热均匀,加热速度较快,但不利于高温环境下电池的散热;加热膜预热法可加热电池单体的侧面,成本较低,对电池散热影响小,但只适合于方形电池<sup>[16]</sup>。

有关电池热管理的研究,集中在单体电池生热特性、电池组散热结构设计等方面,以便将电池组的内部温度控制在适宜范围内,并提高温度均匀性<sup>[17-19]</sup>。目前,环境温度与电池内部生热及内阻变化之间的关系尚不明确,电池内部生热和环境温度对电池SOC的影响机制也不太清晰,而电池生热和电池包内温度非均匀性对单体电池容量差异的影响,也有待进一步研究。

### 4 小结

目前,相关研究缺乏对差异产生机制的系统分析,调控效果差强人意,有必要从电池性能变化规律入手,研究电池外电路结构、参数的关系,以及电池内阻变化、内部生热和外部环境温度之间的关系。分析电池之间最大容量差异演化规律,研究导致锂离子电池之间容量差异的主要因素及调控机制,获得电池组一致性控制策略,可缩小电池成组不一致性并延长使用寿命。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG M, YANG L, ZHAO X W. A GA optimization for lithium-ion battery equalization based on SOC estimation by NN and FLC [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 73: 318 - 328.
- [2] HAN W J, ZHANG L, HAN Y H. Computationally efficient methods for state of charge approximation and performance measure calculation in series-connected battery equalization systems [J]. J Power Sources, 2015, 286: 145 - 158.
- [3] LV J, SONG W J, LIN S L, et al. Investigation on dynamic equalization performance of lithium battery pack management [J]. IET Circuits, Devices and Systems, 2017, 11(4): 388 - 394.
- [4] SHANG Y L, ZHANG C H, CUI N X, et al. A cell-to-cell battery equalizer with zero-current switching and zero-voltage gap based on quasi-resonant LC converter and boost converter [J]. IEEE T Power Electro, 2015, 30: 3 731 - 3 747.
- [5] ZHANG Y H, SONG W J, LIN S L, et al. A critical review on state of charge of batteries [C]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2013, 5, 021403 - 11.
- [6] ZHANG S M, QIANG J X, YANG L, et al. Prior-knowledge-independent equalization to improve battery uniformity with energy efficiency and time efficiency for lithium-ion battery [J]. Energy, 2016, 94: 1 - 12.

- [7] THI T N N, HYON G Y, SAI K O, *et al.* Neuro-fuzzy controller for battery equalisation in serially connected lithium battery pack [J]. IET Power Electronics, 2015, 3(8): 458 - 466.
- [8] LV J, SONG W J, LIN S L, *et al.* Influence of equalization on LiFePO<sub>4</sub> battery inconsistency [J]. International Journal of Energy Research, 2017, 41(8): 1 171 - 1 181.
- [9] WANG L M, CHENG Y, ZHAO X L. Influence of connecting plate resistance upon LiFePO<sub>4</sub> battery performance [J]. Applied Energy, 2015, 147: 353 - 360.
- [10] 王丽梅, 程勇. 集成方式对磷酸铁锂电池组 SOC 间偏差的影响 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 3(24): 540 - 552.
- [11] LIN C J, XU S C, LI Z, *et al.* Thermal analysis of large-capacity LiFePO<sub>4</sub> power batteries for electric vehicles [J]. J Power Sources, 2015, 294: 633 - 642.
- [12] XU M, ZHANG WANG Z X, *et al.* A pseudo three-dimensional electrochemical thermal model of a prismatic LiFePO<sub>4</sub> battery during discharge process [J]. Energy, 2015, 80: 303 - 317.
- [13] SAW L H, YE Y, TAY O A A. Electro-thermal analysis and integration issues of lithium ion battery for electric vehicles [J]. Applied Energy, 2014, 131: 97 - 107.
- [14] 罗玲, 宋文吉, 林仕立, *et al.* 锂离子电池热模型的研究现状 [J]. 电池, 2015, 45(5): 280 - 283.
- [15] YANG N X, ZHANG X W, LI G J. Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements [J]. Applied Thermal Engineering 2015, 80: 55 - 65.
- [16] 白帆飞, 宋文吉, 陈明彪, *et al.* 锂离子电池组热管理系统研究现状 [J]. 电池, 2016, 46(3): 168 - 171.
- [17] 崔占平, 徐云松, 吕劲松, *et al.* 电动汽车用电池组的热性能 [J]. 电池, 2016, 2017, 47(1): 43 - 45.
- [18] CHEN M B, BAI F F, SONG W J, *et al.* A multilayer electrothermal model of pouch battery during normal discharge and internal short circuit process [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 120: 506 - 516.
- [19] LUO L, SONG W J, LIN S L, *et al.* An electro-thermal model and its application on SOE estimation for LiFePO<sub>4</sub>/C battery [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36: 339 - 343.

收稿日期: 2017 - 06 - 06

## 2017 中国(赣州)国际新能源汽车动力电池高峰论坛 暨第九届中国储能与动力电池及其关键材料学术 研讨与技术交流会圆满举行

2017 年 10 月 14 日, 由中国储能与动力电池及其材料专业委员会主办, 江西理工大学和赣州经济技术开发区管委会承办的“2017 年中国(赣州)国际新能源汽车动力电池高峰论坛暨第九届中国储能与动力电池及其关键材料学术研讨与技术交流会”在江西省赣州市开幕。

赣州市委、市政府领导, 中国科学院李永舫院士, 加拿大工程院骆静利院士, 江西理工大学党委书记罗嗣海, 中国储能与动力电池及其材料专委会副主任、中山大学教授孟跃中等嘉宾出席开幕式。会议由中国储能与动力电池及其材料专委会常务副主任兼秘书长、中南大学教授唐有根和清华大学教授、江西理工大学副校长徐盛明主持。会议共有 500 多位储能与动力电池领域的国内外著名专家学者和产业人士参加。

本次会议围绕“新能源汽车动力电池产业可持续发展, 科技服务产业”主题, 展示储能与动力电池及其关键材料领域的最新研发进展及产业化成果, 探讨发展中涉及的学术和技术问题, 促进产学研合作和技术成果转化。

会议安排了三个论坛, 分别是: 锂离子电池论坛、新一代电池发展论坛和动力电池可持续发展论坛等, 围绕当前新能源材料领域的热点问题和发展趋势展开研讨。国内外著名学者、企业家、投资者们共同研讨和推动新能源汽车动力电池及相关材料产业的发展。