

集装箱式储能系统用梯次利用锂电池组的一致性管理研究

朱远征, 李志强, 王 浩, 高 翔, 郑 益, 屈 园, 徐剑虹, 谢建江
(杭州高特电子设备股份有限公司, 杭州 310030)

摘要: 在介绍梯次利用电池在储能应用所面临的战略机遇的基础上, 针对影响梯次利用电池应用过程中最关键的一致性进行了深入研究; 根据梯次利用电池的一致性特点, 采用独特共用母线的主动均衡设计实现任意 2 个电池间能量的转移, 提出了基于电源总线平衡的多因素综合评价分析均衡策略, 以此改善梯次利用电池组的能量利用率低、一致性差等问题, 可延长了电池组的使用寿命, 具有均衡效果明显、应用范围广等特点; 并设计了一套标准集装箱式梯次利用电池储能系统集成方案, 为动力电池退役后规模化应用于储能系统提供了重要参考。

关键词: 集装箱式储能系统; 梯次利用; 退役电池; 电池一致性; 主动均衡

Research on Consistency Management of Echelon Use of Li-ion Battery Pack for Container-type Energy Storage System

ZHU Yunzheng, LI Zhiqiang, WANG Hao, GAO Xiang, ZHENG Yi, QU Yuan, XU Jianhong,
XIE Jianjiang

(Hangzhou Gold Electronic Equipment Inc., Ltd, Hangzhou 310030, China)

Abstract: Based on the introduction of the strategic opportunities of echelon use of batteries in energy storage applications, the consistency problem, which is the most critical issue that affect the echelon use of batteries, is studied in this paper. According to the consistency characteristics of the echelon use of batteries, a unique design of active equalization based on common buses is adopted to realize the energy transfer between any two batteries, and a multi-factor comprehensive evaluation and analysis equalization strategy based on power bus balance is proposed to solve the problems existing in the echelon use of battery pack, such as lower energy utilization efficiency and poor consistency. This approach can extend the service life of the battery pack, and has the advantages including obvious equalization effect and wide application range. Moreover, a scheme of standard echelon use of container-type energy storage system is designed, which provides important reference for the large-scale applications of retired power batteries to the energy storage system.

Keywords: container-type energy storage system; echelon use; retired battery; consistency of battery; active equalization

随着电动汽车、分布式微电网等快速发展, 储能应用需求不断增大, 同时对其应用形式也相应提出了新的要求。可满足占地少、建设快、可移动等特点的集装箱式储能系统应运而生。该系统将储能电池、电池管理系统 BMS (battery management system)、储

能变流器系统 PCS (power control system)、动环监控系统、消防系统、空调系统等集中于一个集装箱内。集装箱式储能系统具有高度集成、运输方便且易于安装的特点, 一经推出即获得了广泛的应用。

在储能系统^[1-5]的应用过程中, 初始投资高是其规模化应用的主要制约因素, 其中储能电池成本占据了很大部分。在《汽车产业中长期发展规划》、《节

能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)》等国家规划中:到2020年,纯电动汽车和插电式混合动力汽车生产能力达200万辆、累计产销量超过500万辆。目前国内电动汽车发展迅速,截至2018年03月,新能源汽车保有量约195万辆,其中电动汽车占比75%以上(工信部数据显示)。电动汽车快速发展必然每年都会有大量车用动力电池退役。大部分退役电池还剩下标称容量的70%~80%,具有很大的再利用价值,在储能、后备电源等环境中仍可继续使用。梯次利用的方式^[6-7]可大幅降低储能电池系统的成本,如何通过均衡手段改善一致性延长电池的使用周期以提高电池的全生命周期的更多价值,是目前国内外研究的热点。

本文为解决梯次电池能量利用率、一致性^[8-13]等性能问题进行了深入的研究,并在近年来多个梯次利用电池储能项目中实际应用,如:在某大型风光储电站3 MW×3 h磷酸铁锂梯次利用储能系统中采用了5 A的主动均衡管理系统;在江西某园区16 MW·h梯次利用三元锂电池集装箱式储能系统微网项目中采用了2 A的主动均衡电池管理系统,配合先进的均衡策略,实现了良好的梯次电池的一致性管理。同时,针对集装箱式电池储能系统实现标准化、模块化设计,在保证经济性的基础上,实现了储能系统中梯次电池的安全性和一致性管理,为储能系统的规模化应用打下了坚实的基础。

1 梯次利用电池储能系统架构

图1是一个典型的40英尺(12 192 mm×2 438 mm×2 896 mm)集装箱储能系统标准化系统架构方案,主要包括以下4个部分:储能变流器PCS、梯次电池组、主动均衡电池管理系统BMS和电池柜,同时配备动力环境控制系统及消防系统。

系统采用退役磷酸铁锂动力电池,总容量1 MWh;根据系统最大功率PCS选用200~500 kW规格;采用8电池支路设计,每支路电池数为192节,退役电池容量约200 Ah,用标准电池模组化设计,每模组为8节电池串联。

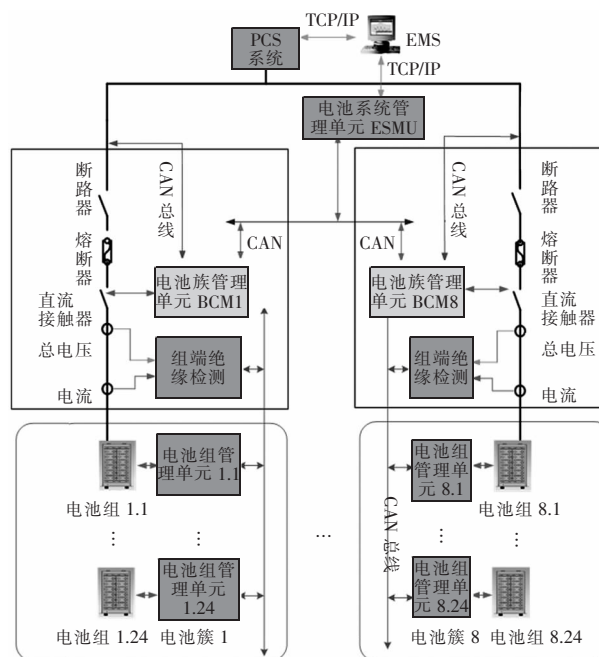


图 1 储能电池系统架构

Fig.1 Architecture of energy storage battery system

标准电池模组设计具有以下优点:①模组电压平台合理,模组电压平台为 $8 \times 3.2 \text{ V} = 25.6 \text{ V}$;②支路节点数量合理,每支路模组数量为24,可控制每支路CAN节点数在30个以内;③模组重量合理,模组总能量为 $8 \times 3.2 \text{ V} \times 200 \text{ Ah} = 5 120 \text{ W} \cdot \text{h}$,以能量密度 $120 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 计算,其重量约为43 kg,重量合理,易于维护。

为满足标准化设计要求,采用分布式主动均衡电池管理系统,可实现电池模组和电池管理系统标准集成设计,解决线束复杂、电池管理系统跨模组连接等问题,实现电池模组智能化、标准化设计。

2 电池组的一致性管理

储能系统由于电池容量大数量多(可能有多达上万节的电池单体串并联),一致性问题较电动汽车更为严重。由于不一致性的存在,必将导致电池不均现象,梯次电池更为明显。图2是电池不一致性的典型现象,可以看出,各电池容量/荷电状态SOC(state of charge)差异导致成组后实际可用容量却只有中间一小段。差异的存在降低了系统的可用

容量,严重影响储能系统的经济效益,长期运行还将大大降低电池系统的可靠性和安全性,所以对电池系统的一致性管理至关重要。

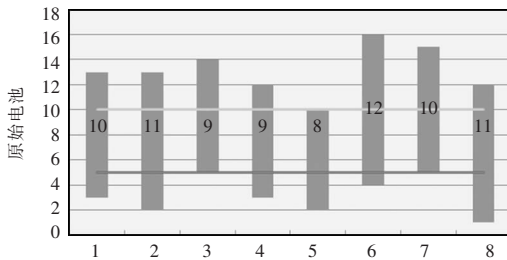


图 2 电池组系统的不一致性

Fig.2 Inconsistency of battery pack system

2.1 电池不一致性问题

2.1.1 单体电池不一致性问题

电池的不一致性主要是由两方面引起:

(1)在电池制造过程中,由于工艺控制存在误差、材料本身混合不均,使得电池两极活性材料的厚度、孔隙率等参数出现差别,导致同一型号的电池在容量、自放电率、内阻上存在不一致性,这种不一致性通常遵循正态分布的规律;

(2)电池串并联连接部分电阻、电池温度、截至电压、SOC、容量、内阻、自放电等存在差异,长期运行导致各电池衰退速率存在差异,并最终加速放大了电池组内各单体电池的不一致性。

电池的不一致性是绝对存在的,如何通过技术手段实现一致性管理,对电池运行管理至关重要。比如改进电池生产工艺、电池的热管理、电池的均衡管理等改善情况,本文主要通过运行过程中有效的均衡管理,来保证电池的一致性。

2.1.2 电池支路不一致性问题

电池支路不一致性主要表现在两个层面:即支路间的电池组不一致性和支路内的单体电池不一致性。其中,支路间的电池组不一致性是指不同支路之间电池组的不一致性,会导致系统能量的利用率低和支路间电池的环流。目前大部分采用电压一致性判断,即当两支路电压基本一致时,实现电池的并联控制,控制环流的大小,避免对电池和回路器件等造成损坏。

本文采用图 3 所示的模块式多支路 PCS,每个

储能变流器模块连接一个储能电池支路,模块分别可控,降低了并联电池的控制复杂度,当某一支路电池出现问题时可单独退出,提高了电池系统的能量利用率,避免了支路间电池不一致性导致的环流问题。

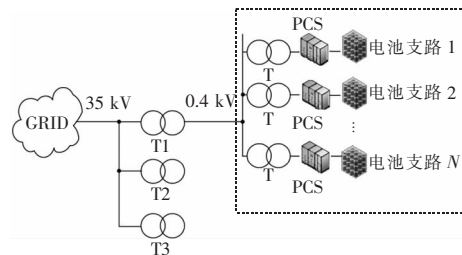


图 3 模块式储能变流器的储能系统框图

Fig.3 Block diagram of energy storage system with modular PCS

2.2 主动均衡方案

2.2.1 主动均衡硬件设计

采用均衡的方式是解决电池不一致性问题的有效手段之一。均衡是通过外部的的方式弥补电池的不一致性,减缓电池的木桶效应,改善电池一致性,进而提升系统的可用容量和使用寿命。目前均衡方式可分为被动均衡(耗散式均衡)和主动均衡(非耗散式均衡)两大类^[14-21]。被动均衡的一般采用电阻放电的方式实现,均衡电流较小,均衡时间短,均衡效果有限,一般多用于电池本身一致性较好和电池热管理设计较好的场合,但采用能量消耗方式产生的热量可能会对系统造成风险,所以其均衡电流一般较小;主动均衡采用能量转移方式,一般均衡电流较大,均衡效果好,多用于容量大、串数多的电池系统,可快速解决电池不一致性,尤其是对梯次电池效果更为明显。均衡时还需保证产品失效率,要确保均衡模块即便失效也能保障电池系统正常运行。

本文采用独特的双向能量转移主动均衡技术,可实现支路内任意两节电池、电池模块内外各电池之间直接进行能量转移。该技术可输出 ± 2 A 恒流电流,既可以对电池进行充电均衡,也可以实现放电均衡。图 4 为双向能量转移主动均衡硬件电路拓扑,图中双向 DC/DC 中一边与 12 V/24 V 供电电源母线相连,另一边通过选通开关连接各单体电池。

母线可起到汇集、分配和传送电能的作用,实现与各电池之间的能量转移。

假设某一时刻判断出 BAT_1 需要放电均衡、 BAT_{12} 需要充电均衡,此时均衡控制器选通开关使 BAT_1 、 BAT_{12} 与对应的双向 DC/DC 导通,双向 DC/DC 将 BAT_1 的多余能量转移到母线上,母线将 BAT_1 多余能量通过双向 DC/DC 对 BAT_{12} 电池进行转移。换言之,母线相当于一个电量中转站,各电池均可以与母线进行电量转移,从而实现任意一节电池将电量转移到其他电池中。储能系统中一个电池支路内所有电池管理系统均采用同一电源供电,故可实现任意两节电池能量的直接转移。

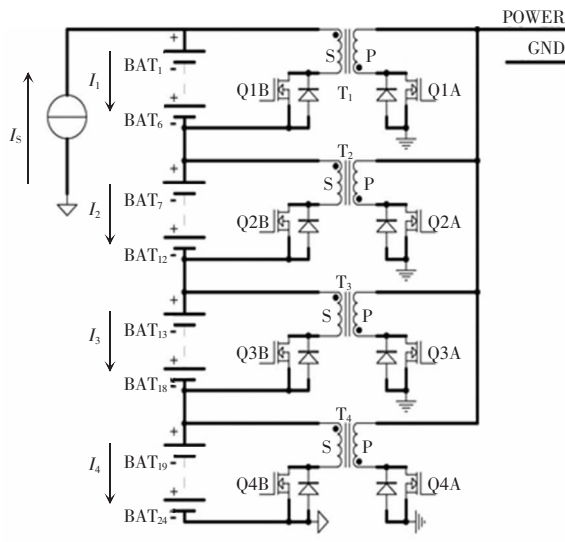


图4 主动均衡硬件拓扑

Fig.4 Hardware topology of active equalization

2.2.2 主动均衡策略设计

主动均衡的硬件拓扑是均衡实现的基础,均衡策略是决定均衡有效性的核心,是电池一致性保证的关键。一般的均衡策略中常采用单体电池电压作为均衡判断的依据,对电压较高的电池均衡放电,对电压较低的电池均衡充电。

本文研究了电压、SOC 和健康状态 SOH(state of health)等数据的综合策略。对 n 节单体电池的连续 m 个采集电压 vol 、采集电流 cur 、环境温度 $temp$,分别进行去峰值取平均操作,最后得到所需的电压、电流、温度数据,分别为 $volavg_i$ 、 $curavg_i$ 、 $tempavg_i$, $0 \leq i \leq n$, i 为整数。同时对 $volavg_i$ 与计算

得到的电池单体荷电状态 SOC_i 、健康状态 SOH_i 等数据分别进行归一化处理,得到第 i 个单体电池的电压以及 SOC 与 SOH 乘积的归一化数值,即

$$\overline{volavg}_i = \frac{volavg_i - \min_{1 \leq i \leq n} \{volavg_j\}}{\max_{1 \leq i \leq n} \{volavg_j\} - \min_{1 \leq i \leq n} \{volavg_j\}} \quad (1)$$

$$\overline{SOC \cdot SOH}_i = \frac{SOC_i \cdot SOH_i - \min_{1 \leq i \leq n} \{SOC_i \cdot SOH_i\}}{\max_{1 \leq i \leq n} \{SOC_i \cdot SOH_i\} - \min_{1 \leq i \leq n} \{SOC_i \cdot SOH_i\}} \quad (2)$$

各电池需要维护充电程度的计算公式为

$$dCha_i = w_1 \times 10 \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=0}^n \overline{volavg}_j - \overline{volavg}_i \right\} + w_2 \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=0}^n \overline{SOC \cdot SOH}_j - \overline{SOC \cdot SOH}_i \right\} \quad (3)$$

式中, w_1 与 w_2 为权值。各电池需要维护放电程度的计算公式为

$$dDis_i = w_1 \times 10 \left\{ \overline{volavg}_i - \frac{1}{n} \sum_{j=0}^n \overline{volavg}_j \right\} + w_2 \left\{ \overline{SOC \cdot SOH}_i - \frac{1}{n} \sum_{j=0}^n \overline{SOC \cdot SOH}_j \right\} \quad (4)$$

在电池组运行过程中,可以实时的对电池各种特征数据进行分析,获取需要进行维护充放电的程度,控制需要维护充电电池数与维护放电电池数的配比,达到总线平衡,该方法有效地保证电池组的一致性,进一步延长电池组的使用寿命。

3 实验与结果

针对该主动均衡模块,进行了大量实验。图5为某一组电动汽车退役电池组静置状态下的均衡效果。由图可见,各单体电池一致性较差,采用主动均衡模块后,静置状态下电池一致性大大改善。

运行3年多的某电动出租车退役下来的电池,在原有电池系统的基础上增加主动均衡模块后,经过8次相同工况下充放电测试。图6为其退役电池放电状态下均衡效果,由图可见,放电过程中最大电压与最小电压的压差变化情况,主动均衡压差逐渐变小,放电时间变长,容量显著提升,其中图中压

差存在波动情况为均衡导致的阶段性压差变化。

某车辆上退役下来的两组电池,初始容量基本相同,其中一组电池不采用均衡,另一组电池采用双向主动均衡,两者循环测试对比,测试结果如图 7 所示。图中数据表明,主动均衡使电池容量的衰减得到延缓,改善了成组电池的木桶效应,提升了电池组的循环次数,电池组整体寿命大大延长。

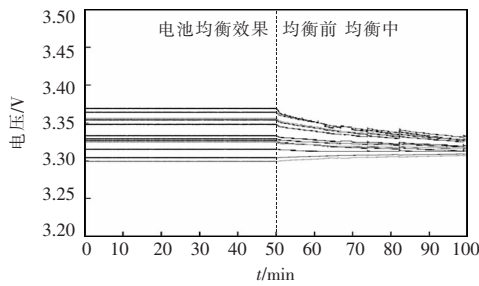


图 5 某退役电池组静置状态下均衡效果

Fig.5 Equalization result of one retired battery pack in open circuit state

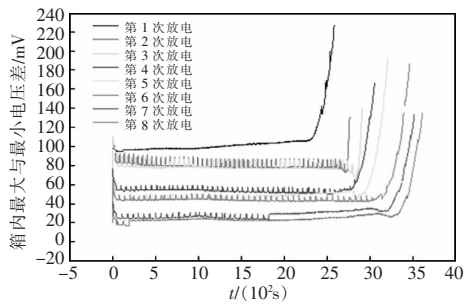


图 6 某退役电池组放电状态下均衡效果

Fig.6 Equalization result of one retired battery pack in discharging state

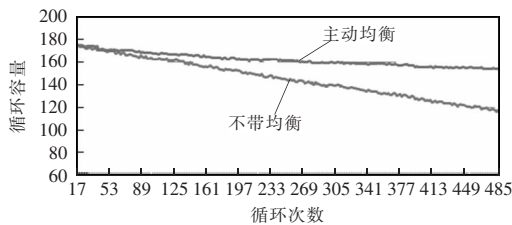


图 7 主动均衡和不带均衡的电池系统对比测试

Fig.7 Comparison test of battery system with active equalization and without equalization

4 结语

在梯次利用电池用于储能系统的工程实践中,

为解决未来退役电池规模化应用,本文提出了一种标准的集装箱式梯次利用电池储能系统设计方案。系统的标准化带来了系统可靠性的提高、成本的降低以及更易于维护等优点,为退役电池的规模应用打下了坚实的基础。

大容量梯次利用电池系统应用的主要问题是电池一致性问题。电池不一致性会导致电池系统可用容量低、系统寿命短、降低经济效益与系统的安全性。本文从系统设计出发,采用模块式 PCS 和主动均衡技术,可解决储能系统中电池支路间及支路内电池一致性问题,提高了储能系统能量利用率与系统效率,提高储能系统的经济效益和安全性。

本文经过了实践的验证,适合规模化应用,为未来大量退役的电动汽车动力电池找到了新的发展方向,节约了社会资源。

参考文献:

- [1] 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(in Chinese).
- [2] 林海雪. 现代储能技术应用概况及展望[J]. 电源学报, 2015, 13(5): 34-40.
Lin Haixue. Applying situation and prospects of modern energy storage technology[J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(5): 34-40(in Chinese).
- [3] 王松岑, 来小康, 程时杰. 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.
Wang Songcen, Lai Xiaokang, Cheng Shijie. 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(in Chinese).
- [4] 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(in Chinese).

- [5] Divya K C, Østergaard J. Battery energy storage technology for power systems-An overview[J]. *Electric Power Systems Research*, 2009, 79(4): 511-520.
- [6] 白恺, 李娜, 范茂松, 等. 大容量梯次利用电池储能系统工程技术路线研究[J]. *华北电力技术*, 2017(3): 39-45.
Bai Kai, Li Na, Fan Maosong, et al. Research on the technical roadmap for engineering application of large-scale echelon use battery energy storage system[J]. *North China Electric Power*, 2017(3): 39-45(in Chinese).
- [7] 甘江华, 刘怀照, 陈世峰, 等. 梯次利用电池的中型储能系统工程方案设计[J]. *电器与能效管理技术*, 2017(13): 82-87.
Gan Jianghua, Liu Huaizhao, Chen Shifeng, et al. Project design of medium-sized energy storage system with echelon use batteries[J]. *Low Voltage Apparatus*, 2017(13): 82-87 (in Chinese).
- [8] 程蕊, 张仁柏, 陈延伟. 梯次利用动力锂电池的单体电池电化学性能[J]. *电源技术*, 2017, 41(4): 548-550.
Cheng Rui, Zhang Renbai, Chen Tingwei. Electrochemical performance of single cell from secondary use of power Li-ion battery[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2017, 41(4): 548-550(in Chinese).
- [9] 徐晶. 梯次利用锂离子电池容量和内阻变化特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
Xu Jing. Research on the variation characteristics of capacity and internal resistance of lithium-ion batteries echelon use[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014(in Chinese).
- [10] 邹幽兰. 基于退役动力锂电池容量、内阻和荷电状态的建模与参数估计[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
Zou Youlan. Modeling and parameter estimation of retired lithium-ion power battery based on capacity, resistance and the stage of charge[D]. Changsha: Central South University, 2014(in Chinese).
- [11] 陈伟华, 李娜, 苑津莎. 梯次利用锂离子电池循环性能分析[J]. *华北电力技术*, 2017(6): 14-19.
Chen Weihua, Li Na, Yuan Jinsha. Cycle performance analysis of second-use of lithium-ion power batteries [J]. *North China Electric Power*, 2017(6): 14-19(in Chinese).
- [12] 李香龙, 陈强, 关宇, 等. 梯次利用锂离子动力电池试验特性分析[J]. *电源技术*, 2013, 37(11): 1940-1943.
Li Xianglong, Chen Qiang, Guan Yu, et al. Test characteristic analyse of second use of lithium-ion power batteries[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2013, 37(11): 1940-1943(in Chinese).
- [13] 王震坡, 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(in Chinese).
- [14] 马泽宇, 姜久春, 文峰, 等. 用于储能系统的梯次利用锂电池组均衡策略设计[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(3): 106-111.
Ma Zeyu, Jiang Jiuchun, Wen Feng, et al. Design of equilibrium strategy of echelon use li-ion battery pack for energy storage system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(3): 106-111(in Chinese).
- [15] 雷娟, 蒋新华, 解晶莹. 锂离子电池组均衡电路的发展现状[J]. *电池*, 2007, 37(1): 62-63.
Lei Juan, Jiang Xinhua, Xie Jingying. The status quo of development of equalization circuit of Li-ion batteries [J]. *Battery Bimonthly*, 2007, 37(1): 62-63(in Chinese).
- [16] 吕航, 刘承志. 电动汽车磷酸铁锂电池组均衡电路设计[J]. *电源学报*, 2016, 14(1): 95-101.
Lü Hang, Liu Chengzhi. Design on balancing circuits for LiFePO4 battery stacks in electric vehicles[J]. *Journal of Power Supply*, 2016, 14(1): 95-101(in Chinese).
- [17] 陈晶晶. 串联锂离子电池组均衡电路的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
Chen Jingjing. Research of equalization for series-connected lithium-ion batteries[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [18] 韩广欣, 韩金东, 张秀军, 等. 锂离子电池组均衡充电的研究进展[J]. *电池工业*, 2009, 14(1): 65-68.
Han Guangxin, Han Jindong, Zhang Xiujun, et al. Research progress on equalization charging of Li-ion battery [J]. *Chinese Battery Industry*, 2009, 14(1): 65-68(in Chinese).
- [19] 吴哲, 陈容柱, 赵深, 等. 一种改进的锂电池组均衡方法及其均衡电路: 中国, 201310590189.X[P]. 2014-03-12.

- [20] 王浩, 徐剑虹. 一种基于共用设备供电电源的隔离双向恒流维护系统: 中国, 201510041242.X[P]. 2015-05-27.
Wang Hao, Xu Jianhong. Isolated bidirectional constant-current maintenance system based on power supply source of shared device: China, 201510041242.X[P]. 2015-05-27.
- [21] Moore S W, Schneider P J. A review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems[C]/SAE 2001 World Congress. Detroit. Michigan, U.S.A., 2001: 1-7.



朱运征

作者简介:

朱运征(1983-),男,通信作者,硕士研究生,工程师,研究方向:储能系统集成及储能 BMS 设计,E-mail:zhuyunzheng@126.com。

李志强(1980-),男,本科,研究方向:储能系统集成,E-mail:lizhiqiang@china-gold.com。

王浩(1987-),男,本科,研究方向:BMS 电池性能诊断与均衡等研究,E-mail:wanghao@china-gold.com。

高翔(1975-),男,硕士研究生,工程师,研究方向:BMS 嵌入式软件开发,E-mail:gaoxiang@china-gold.com。

郑益(1982-),男,本科,工程师,研究方向:BMS 电池性能诊断与均衡等研究,E-mail:zy@china-gold.com。

屈园(1992-),男,本科,研究方向:储能系统集成,E-mail:15590558061@163.com。

徐剑虹(1961-),男,本科,高级工程师,研究方向:电池管理系统设计,E-mail:xujh@china-gold.com。

谢建江(1975-),男,本科,研究方向:储能系统集成设计,E-mail:xjj@china-gold.com。

(上接第 42 页)

dynamics of DC-link capacitor to realize self-synchronization[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1565-1577.

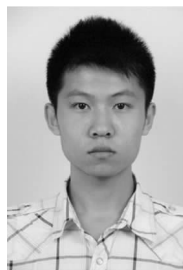
- [19] 熊连松, 刘小康, 卓放, 等. 光伏发电系统的小信号建模及其控制器参数的全局优化设计方法[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1234-1241.

Xiong Liansong, Liu Xiaokang, Zhuo Fang, et al. Small-signal modeling of photovoltaic power generation system and global optimal design for its controller parameters[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1234-1241 (in Chinese).

- [20] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154.

Yuan Xiaoming, Cheng Shijie, Hu Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE,

2016, 36(19): 5145-5154 (in Chinese).



修连成

作者简介:

修连成(1992-),男,硕士研究生,研究方向:新能源发电及利用、电力市场,E-mail:xiuliancheng@qq.com。

刘娣(1983-),女,通信作者,博士,副教授,研究方向:智能控制技术、新能源发电技术;E-mail:695571372@qq.com。

康志亮(1976-),男,硕士,教授,硕士生导师,研究方向:信号处理、新能源技术,E-mail:kangzhiliang96@163.com。

宋汉梁(1991-),男,硕士研究生,研究方向:新能源发电及利用,E-mail:709031348@qq.com。

林健(1971-),男,博士,教授,硕士生导师,研究方向:电机传动、新能源技术,E-mail:zdhxlj@njit.edu.cn。