

蓄电池能量均衡技术研究综述

梁嘉羿, 王友仁, 黄薛, 耿星

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 串联电池组的均衡技术是电池管理系统的关键技术之一, 可以减小串联电池组单体间的不一致性, 提高蓄电池的能量利用率和使用寿命。介绍串联电池组不一致性产生的原因及危害; 从均衡拓扑结构、均衡控制策略等角度, 深入分析了均衡技术的发展现状; 在研究了现有均衡拓扑结构优缺点的基础上, 分析了近几年的新技术和解决方案, 并针对目前均衡技术存在的难点, 给出了研究发展的方向。

关键词: 串联电池组; 电池管理; 电池均衡; 主动均衡; 均衡控制策略

中图分类号: TM912 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2018) 03-0026-05

Research Status of Balancing Technique for Series Connected Battery

LIANG Jiayi, WANG Youren, HUANG Xue, GENG Xing

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The balancing technique for series connected battery is one of the most important technologies in the battery management system, which can be used to reduce the damage caused by the inconsistency of series connected battery, improve the energy utilization of storage battery and extend its service life. This paper introduces the cause of inconsistency of the series connected battery and its harm, and deeply analyzes the research status of the battery equalization from the aspects of structure of balanced topology and balancing control strategy. On the base of analyzing the advantage and disadvantage of the current balanced topology, it also makes an analysis of the new technologies and ways of solutions and according to the existing difficulties of balancing technology, points out the direction of its research and development.

Keywords: series connected battery; battery management system; battery equalization; active balancing; balancing control strategy

0 引言

近年来, 随着能源危机和环境污染等问题越来越突出, 新能源的应用已经成为我国十三五规划的发展重点^[1]。蓄电池作为一种清洁、无污染的能源, 在智能电网的储能系统和电动汽车领域得到了广泛的应用^[2-3]。单节蓄电池电压较低, 需要将多个单体电池串联使用才可以满足不同的电压需求^[4]。在循环使用中, 电池组中单体电池之间会产生不一致性, 这将降低电池组容量利用率并严重影响电池的使用寿命。因此, 在储能蓄电池使用过程中需要进行均衡管理以提高电池组的一致性^[5]。

本文研究了串联电池组不一致性产生的原因及危害。分析了均衡衡量准则的选取及目前研究存在的问题。研究了几种典型均衡电路的优点及难以逾越的技术问题, 总结了国内外最新的改进方法, 从均衡速度、均衡效率、成本等角度对均衡电路进行比较。介绍了均衡控制策略的发展现状。研究表明均衡技术不仅提高了电池组的能量利用率, 更延长了电池的使用寿命。因此, 对均衡技术的研

究具有重要的理论意义及工程前景。

1 串联电池组的不一致性

不一致性主要表现为组内电池单体的端电压、容量以及 SOC 等特性参数的差异。电池组的不一致性主要是由内部原因和外部原因引起的。内部原因即生产过程中的不一致性, 由于原材料参差不齐, 生产工艺、环境等因素的变化, 导致同一型号的蓄电池初始性能不一致; 外部原因即循环使用过程中的不一致性, 主要是指单体电池之间容量衰减速率、自放电率、充放电能力等性能的不同造成的不一致。随着充放电的循环, 单体间的性能差异会更加明显, 导致不一致性更加严重^[6]。

蓄电池的不一致性会导致电池组可使用容量减小, 降低电池的使用寿命, 严重时甚至会导致安全事故。为了减小不一致性, 提高电池组的使用寿命, 通过电池均衡管理系统实时检测单体电池性能状态, 通过能量耗散或者能量转移的方式重新分配组内单体的能量, 减小单体之间容量的差异, 提高容量利用效率。

基金项目: 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金(SAMC14-JS-15-051); 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfjj20150314)

作者简介: 梁嘉羿(1990-), 男, 硕士研究生, 从事蓄电池均衡充放电技术研究。

2 均衡衡量准则

均衡系统需要选取合适的特性参数作为均衡变量,其应具有以下3点特征:1)准确反映电池组的不一致状态;2)易于获取;3)有足够的精度。如今均衡衡量准则大多采用以下3种参数:剩余容量、端电压和荷电状态(SOC)。

2.1 剩余容量

剩余容量作为均衡衡量准则可以使电池组充分放电从而提高电池组的放电容量。但是目前对剩余容量的估算方法大多是离线估算,并且估算精度很难保证。

2.2 端电压

以电池单体的端电压作为均衡衡量准则,能够有效地防止电池过充过放,而且电压便于测量,精度相对较高^[7]。但是随着电池的循环使用,其容量、内阻等参数会发生变化,造成较大的误差。

2.3 荷电状态 SOC

以SOC作为均衡衡量准则理论上可以保证各单体电池放电深度一致^[8]。是当前研究最多的方法。

文献[9]以通过OVC-SOC拟合曲线,在电池静态下估算蓄电池的SOC,但是无法实现在线估算。文献[10]提出以热力学荷电状态作为均衡衡量准则,动力学荷电状态作为均衡控制依据的均衡控制策略,提高了估算精度。

3 均衡电路

均衡电路是电池组均衡系统必不可少的重要部分。本文介绍了被动均衡和主动均衡技术,并按储能元件的不同对主动均衡电路进行分类(图1)。

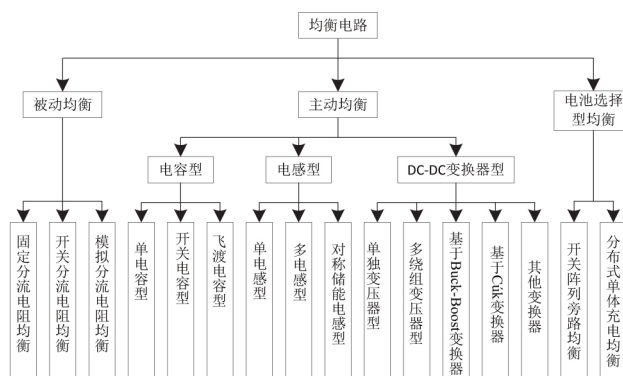


图1 电池均衡电路分类

3.1 被动均衡

被动均衡电路也叫能量耗散型均衡电路,通过耗能电阻分流的方式耗散电量高的电池电量来降低电池组的不一致性。可以分为如图2(a)所示的固定分流电阻均衡电路^[11]、图2(b)所示的开关型分流电阻均衡电路^[12]以及图2(c)所示的模拟分流均衡电路^[13]。

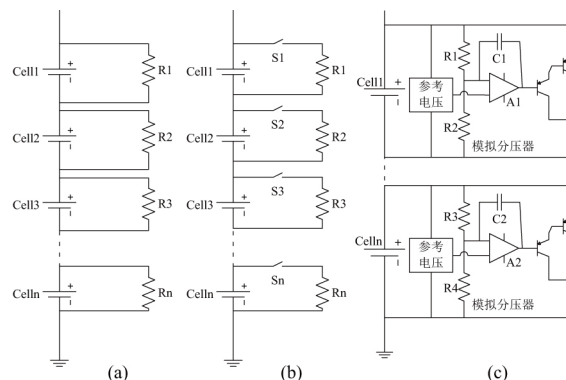


图2 被动均衡电路

被动均衡的优点是元器件少、成本低、可靠性高和控制简单等。但是,被动均衡电路在均衡过程中消耗了大量的能量,能量利用率低,同时电阻分流产生大量的热量,存在热管理问题。目前只是用在充电均衡中。

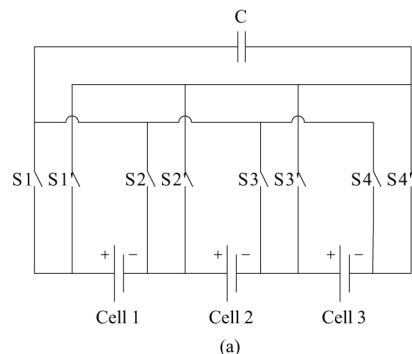
3.2 主动均衡

1) 电容型均衡电路

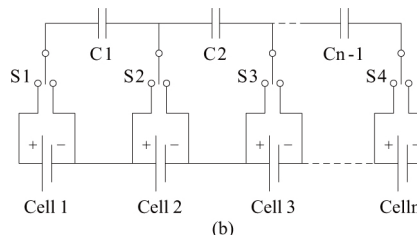
图3(a)为单电容型均衡电路,该电路通过开关矩阵选择电池,可以实现任意两节电池间的能量转移,均衡速度快,均衡效率高。但是,过多的开关增加了控制的难度和开关器件上能量的损耗^[14]。

图3(b)为开关电容型均衡电路。该电路通过开关的切换可以实现相邻两节电池的均衡,在保留了单电容型均衡电路均衡效率高的特点的同时,减小了控制的难度^[15]。

基于储能电容的均衡电路只能以端电压为均衡衡量准则,不能实现SOC均衡。当两节电池电压相差较小时,均衡速度较慢。文献[16]使用了两层电容进行能量转移,提高了均衡速度。文献[17]通过给顶端和底端的两节电池并联电容,减少了均衡传输节点,提高了均衡速度和均衡效率。



(a)



(b)

图3 电容型均衡电路

2) 电感型均衡电路

图 4(a) 所示的是单电感型均衡电路,通过开关矩阵选择电池来实现任意两节电池单体间的均衡,这种电路的优点在于均衡速度快,均衡效率高。但是开关控制复杂^[18]。

图 4(b) 所示的是对称型储能电感均衡电路。这是一种基于单向 Buck-Boost 变换器的一对多的均衡电路结构,相对于双向的 Buck-Boost 均衡电路减少了元器件数量,节约了电路成本,但是电路的均衡速度和均衡效率有所降低^[19]。

文献[20]通过串联一个电容的方式与电感构成 LC 振荡回路,降低了开关器件的能量损耗。Lee K 优化了单电感均衡电路的开关矩阵,减少了开关器件数量^[21]。

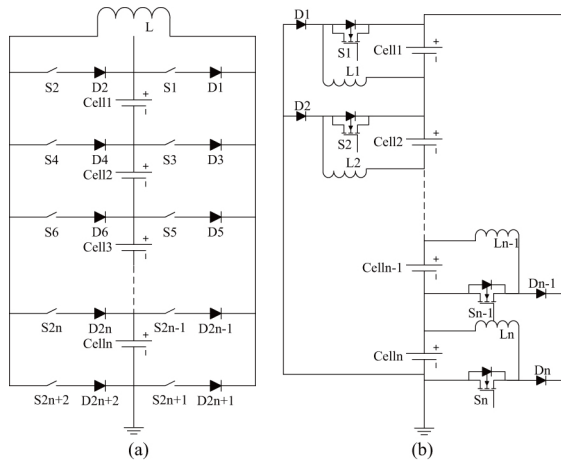


图 4 电感型均衡电路

3) 变压器型均衡电路

单独变压器型均衡电路如图 5(a) 所示,每一节电池都并联了一个独立的反激式变换器。通过开关选择需要均衡的电池,PWM 波驱动均衡控制开关 Q 导通,电池组的电量将转移到被均衡电池中^[22]。

多绕组变压器型均衡电路如图 5(b) 所示,通过一个多输出变压器将整个电池组的能量转移到电压较低的单体电池中。电池组的能量转移到变压器的源边中储存,通过变压器次级绕组转移到电池单体中,电压低的电池单体会得到较多的能量^[23]。

基于变压器的均衡电路的优点是均衡速度快、精度高、控制简单。缺点是变压器的漏感会导致均衡偏差的出现,很难补偿,难以实现多输出绕组的精确匹配,且不易于模块化。同时变压器的匝数比也制约了电池组的容扩性,可扩展性差。

4) Buck-Boost 变换器

Buck-Boost 变换器均衡电路如图 6 所示,在相邻的两节电池之间放置一个双向 Buck-Boost 均衡模块,通过控制开关实现电量在相邻两节电池间的传递。这种均衡电路控制简单,均衡速度快,能量损耗小,扩展性好。但是能量只能在相邻单体之间传递,当两节电池距离较远时,能量逐级传递,不仅增加了均衡时间,也降低了均衡效率^[24]。

5) Cúk 变换器

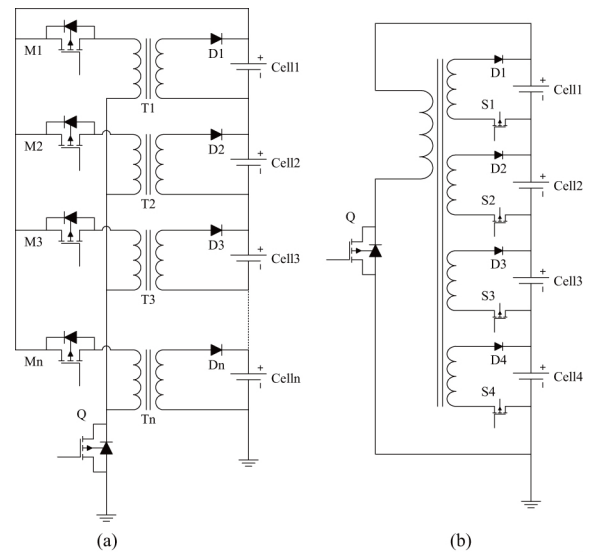


图 5 变压器型均衡电路

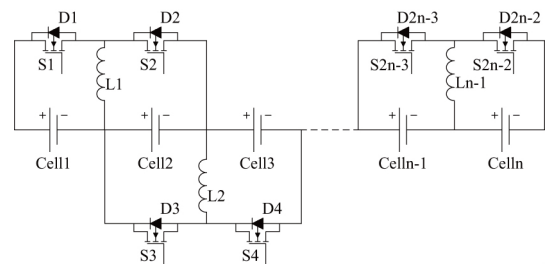


图 6 Buck-Boost 变换器型均衡电路

Cúk 变换器均衡电路如图 7 所示,该电路可以实现相邻两节电池间的能量转移。该电路在开启均衡时均衡电流是连续工作的,具有更高的均衡速度^[25]。

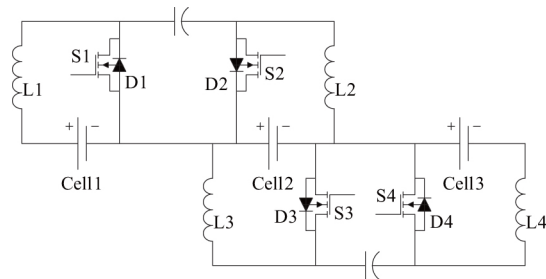


图 7 Cúk 变换器型均衡电路

3.3 其他均衡拓扑结构

近几年,国内外也提出了一些新型的均衡拓扑结构。Chol-Ho Kim 提出了一种模块化的均衡结构,可以实现 88 节电池的均衡管理,并通过 2 个单向的变换器实现了能量的双向传递^[26]。Chih-Chiang Hua 使用 2 个变压器交替工作,使均衡电流工作在一个连续的模式,提高了均衡速度^[27]。同济大学的戴海峰提出了一种新型的 DC-DC 变换器,通过开关矩阵选择电池单体,将电量较高的单体能量转移到整个电池组^[28]。文献[29]将软开关技术使用在了均衡电路中,降低了开关损耗。

表 1 均衡方法比较

均衡电路	开关	电阻	电容	电感	变压器	二极管	均衡速度	均衡效率	均衡状态	控制	成本
固定电阻	—	n	—	—	—	—	非常慢	非常低	充电	很简单	很低
开关电阻	n	n	—	—	—	—	非常慢	非常低	充电	很简单	很低
单电容	4n	—	1	—	—	4n	非常慢	非常高	充电/放电	较复杂	一般
开关电容	2n	—	n-1	—	—	—	非常慢	非常高	充电/放电	一般	较低
单电感	4n	—	—	1	—	4n	较快	较低	充电/放电	较复杂	一般
对称储能电感	n	—	—	n	—	n	较慢	较低	充电/放电	一般	较低
单独变压器	2n+1	—	—	—	n	2n	一般	较低	充电/放电	一般	较高
多绕组变压器	n+1	—	—	—	1	n+1	一般	较低	充电/放电	较简单	很高
Buck-Boost 变换器	2(n-1)	—	—	n-1	—	2(n-1)	较快	一般	充电/放电	一般	较高
Cúk 变换器	2(n-1)	—	n-1	2(n-1)	—	2(n-1)	较快	较高	充电/放电	一般	很高
改进型 Buck-Boost	n+1	—	1	n+1	—	n+1	较慢	较低	充电/放电	一般	较低

4 均衡控制策略

均衡的控制策略是一个完整的均衡系统的重要组成部分。相对复杂的均衡电路会限制均衡速度、稳定性和均衡效率的发展。为了解决这个问题必须在均衡策略上进行改进^[30]。通过改进均衡策略可以提高均衡速度,降低能量损耗。

对于集中式均衡拓扑结构,采取极值均衡法。找到串联电池组中的最大值或最小值。通过对电量最高的电池单体放电或者对电量最低的电池单体充电的方式实现均衡^[31]。该策略在一致性较差的情况下均衡速度慢且容易造成控制逻辑混乱。对于串联型均衡拓扑结构,只能对相邻两节电池进行均衡,所以一般采用差值比较法进行均衡控制。通过比较相邻两节电池的电压并进行能量转移。

电池使用过程中的状态参数变化会影响均衡的速度,Z. Amjadi 等人提出通过实时监测电池组的状态信息来控制 PWM 波的输出,从而控制均衡电流,提高均衡速度^[32]。模糊控制策略可以减少均衡时间^[33],PI 控制可以有效地提高均衡的准确性和稳定性^[34]。文献[35]提出的 Fuzzy-PI 控制方法结合了模糊控制和 PI 控制的优点。文献[36]则提出了通过控制 PWM 波的频率来提高均衡速度。几乎所有的控制策略都是一个基于电压不一致性的 PFM 模型。

5 结语

综上所述,串联电池组均衡技术的研究目前已经取得了长足的发展,但是在均衡衡量准则以及均衡拓扑结构上仍然存在需要改进的问题。

1) 在均衡衡量准则上,对 SOC 进行均衡才能根本上保证各单体充放电深度的一致性,而在均衡过程中快速准确地估算 SOC 也是均衡技术的一个难点。

2) 在均衡电路方面,现有的基本均衡技术都具有各自的优势,但也存在效率低、速度慢、成本高的问题,导致均衡能力不能够达到最好(表 1)。最佳的均衡电路的能

量传递路径必须是长串联电池组中的任意两个单体,均衡电流的传输节点尽可能的减少,体积小,成本低,且方便模块更换与数量扩张。

3) 对于均衡控制策略,要求能够实现动态均衡,自动调整均衡阈值和均衡策略,均衡精度高,能量转换效率高,使用安全可靠。

参考文献:

- [1] 李琼慧,王彩霞. 新能源发展关键问题研究[J]. 中国电力, 2015, 48(1): 33-36.
- [2] Manenti A, Abba A, Merati A, et al. A New BMS Architecture Based on Cell Redundancy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(9): 4314-4322.
- [3] Miao Z, Xu L, Disfani V R, et al. An SOC-Based Battery Management System for Microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 966-973.
- [4] 刘红锐,张昭怀. 锂离子电池组充放电均衡器及均衡策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 186-192.
- [5] Rahimi-Eichi H, Ojha U, Baronti F, et al. Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2013, 7(2): 4-16.
- [6] 祁华铭. 纯电动汽车能量均衡技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2015.
- [7] K. Tae-Hoon, P. Nam-Ju, K. Rae-Young, H. Dong-Seok. Low cost multiple zero voltage/zero current switching battery equalization circuit with single soft-switching resonant cell[C]. Proceedings of the Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2012:419-424.
- [8] Maharjan L, Inoue S, Akagi H, et al. State-of-Charge (SOC)-Balancing Control of a Battery Energy Storage System Based on a Cascade PWM Converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(6): 1628-1636.
- [9] 孙金磊, 逯仁贵, 魏国, 等. 串联电池组双向全桥 SOC 均衡控制系统设计[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(3): 76-81.
- [10] 冯飞, 宋凯, 逯仁贵, 等. 磷酸铁锂电池组均衡控制策略及荷电状态估计算法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 22-29.
- [11] Stuart T A, Zhu W. Fast Equalization for Large Lithium Ion Batteries[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, ,

- 2000, 24(7): 27-31.
- [12] Eghtedarpour, N.; Farjah, E., Distributed charge/discharge-control of energy storages in a renewable-energy-based DC micro-grid [J]. IET on Renewable Power Generation, 2014, 8(1): 45-57.
- [13] Raman S R, Xue X D, Cheng K W E. Review of charge equalization schemes for Li-ion battery and super-capacitor energy storage systems[C]. 2014 International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAEC), Rukmini Knowledge Park, Bangalore, India, 2015:1-6.
- [14] F. Baronti, G. Fantechi, R. Roncella, R. Saletti, et al. High-Efficiency Digitally Controlled Charge Equalizer for Series-Connected Cells Based on Switching Converter and Super-Capacitor [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 1139-1147.
- [15] Moon-Young K, Chol-Ho K, Jun-Ho K, et al. A Chain Structure of Switched Capacitor for Improved Cell Balancing Speed of Lithium-Ion Batteries [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8): 3989-3999.
- [16] A. Baughman, M. Ferdowsi. Double-tiered switched capacitor battery charge equalization technique [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008(55): 2277-2285.
- [17] Moon-Young K, Chol-Ho K, Jun-Ho K, et al. A Chain Structure of Switched Capacitor for Improved Cell Balancing Speed of Lithium-Ion Batteries [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8): 3989-3999.
- [18] Yarlaga S, Hartley T T, Husain I. A Battery Management System Using an Active Charge Equalization Technique Based on a DC/DC Converter Topology [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(6): 2720-2729.
- [19] Woei-Luen C, Shin-Rung C. Optimal charge equalisation control for series connected batteries [J]. IET on Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(8): 843-854.
- [20] Ye Yuanmao, K. W. E. Cheng. Zero-Current Switching Switched-Capacitor Zero-Voltage-Gap Automatic Equalization System for Series Battery String [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 27(7): 3234-3242.
- [21] Lee K, Chung Y, Sung C, et al. Active Cell Balancing of Li-Ion Batteries Using LC Series Resonant Circuit [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(9): 5491-5501.
- [22] 荣德生 陈淑涵 李洪珠 等. 一种新型双开关反激式电池串电压均衡方法 [J]. 电源技术, 2015, 39(6): 1219-1221.
- [23] Einhorn M, Roessler W, Fleig J. Improved Performance of Serially Connected Li-Ion Batteries With Active Cell Balancing in Electric Vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(6): 2448-2457.
- [24] Lee, Yuang-Shung, Guo-Tian Cheng. Quasi-Resonant Zero Current Switching Bidirectional Converter for Battery Equalization Applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(5): 1213-1224.
- [25] Y.-S. Lee and C. Ming-Wang. Intelligent control battery equalization for series connected lithium-ion battery strings [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52: 1297-1307.
- [26] Kim C, Kim M, Moon G. A Modularized Charge Equalizer Using a Battery Monitoring IC for Series-Connected Li-Ion Battery Strings in Electric Vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(8): 3779-3787.
- [27] Chih-Chiang H, Yi-Hsiung F, Pei-Hong L. Charge Equalization for Series-Connected LiFePO₄ Battery Strings [J]. Power Electronics, 2015, 8(6): 1017-1025.
- [28] Dai H, Wei X, Sun Z, et al. A novel dual-inductor based charge equalizer for traction battery cells of electric vehicles [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015, 67: 627-638.
- [29] Yunlong S, Chenghui Z, Naxin C, 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 Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 3731-3747.
- [30] Z. Amjadi, S. S. Williamson. Novel control strategy design for multiple hybrid electric vehicle energy storage systems [C]. in Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Twenty-Forth Annual IEEE, 2009, 597-602.
- [31] Zeliang S, Haifeng Z, Xiaoqiong H, et al. One-inductor-based auxiliary circuit for dc-link capacitor voltage equalisation of diode-clamped multilevel converter [J]. Power Electronics, 2013, 6(7): 1339-1349.
- [32] Z. Amjadi, S. S. Williamson. Novel control strategy design for multiple hybrid electric vehicle energy storage systems [C]. in 24th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009: 597-602.
- [33] Thi T N N, Hyon-Gi Y, Oruganti S K, et al. Neuro-fuzzy controller for battery equalisation in serially connected lithium battery pack [J]. Power Electronics, 2015, 8(3): 458-466.
- [34] P. A. Cassani, S. S. Williamson. Design, testing, and validation of a simplified control scheme for a novel plug-in hybrid electric vehicle battery cell equalizer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(12): 3956-3962.
- [35] R. Ling, Y. Dong, H. B. Yan, et al. Fuzzy-PI control battery equalization for series connected lithium-ion battery strings [C]. in 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2012(4): 2631-2635.
- [36] Zhang D, Zhu G, He S, et al. Balancing control strategy for Li-ion batteries string based on dynamic balanced point [J]. Energies, 2015, 8(3): 1830-1847.

收稿日期: 2016-10-17