

一种改进的储能锂电池主动均衡拓扑研究^{*}

巫春玲 程琰清 刘智轩 胡雯博 周翔宇

(长安大学 电子与控制工程学院 西安 710000)

摘要: 针对光伏储能电站存在的电池不一致性问题,设计了一种基于反激式变压器和电感的分层主动均衡系统。该系统采用分层均衡的策略,第1层为电池包的组内均衡,通过储能电感实现能量在相邻电池之间的快速转移;第2层为不同电池包的组间均衡,通过基于反激式变压器的均衡电路来实现。以电池的荷电状态(SOC)为均衡指标,在MATLAB/Simulink中搭建了6节串联锂电池组仿真模型。实验结果显示,经过组内均衡和组间均衡后,串联锂电池组内的每一节单体电池的SOC值都达到了100%,且未造成过充现象的发生,均衡用时较短,达到了预期的效果。

关键词: 光伏发电;主动均衡;锂电池;反激式变压器

中图分类号: TM911 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4054

Design of a novel active equalization system for lithium batteries in photovoltaic energy storage power station

Wu Chunling Cheng Yanqing Liu Zhixuan Hu Wenbo Zhou Xiangyu

(College of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710000, China)

Abstract: Aiming at the problem of battery inconsistency in photovoltaic energy storage power station, a hierarchical active equalization system based on flyback transformer and inductance is designed. The system adopts hierarchical equalization strategy. The first layer is the internal group equalization of battery packs, and the energy transfer between adjacent batteries is realized by the inductance; the second layer is the equalization of different battery packs, which is realized by the equalization circuit based on flyback transformer. Taking the state of charge (SOC) of the battery as the equilibrium index, a simulation model of six series lithium batteries was built in MATLAB/Simulink. The experimental results show that after a period of internal group equalization and different groups equalization, the SOC of each cell in the series lithium batteries reaches 100% without causing overcharge. The equalization time is short, and the effects is perfect.

Keywords: photovoltaic power generation; active equalization; lithium battery; flyback transformer

0 引言

太阳能以其储量丰富、分布广泛、清洁等优点,成为最具发展潜力的可再生能源之一。与常规的能源电力不同,光伏发电受外界环境的影响,具有不可避免的间歇性。如果直接将光伏发电站接入电网,会降低电网的可靠性,增加系统的复杂性,因此建设光伏储能电站是解决这一问题的最好方案^[1]。大容量储能系统需要将数目众多的锂电池串联使用。锂电池组在实际使用中,由于各单体电池的不一致性,降低了电池组的整体性能。目前,电池均衡是减少电池组不一致性的有效方法。电池均衡根据有无能量损失可

分为被动均衡和主动均衡。被动均衡依靠旁路电阻放电,通过对高电量电池放电,使其跟模块中最低电量的电池保持一致。该方案结构简单、易于实现,但电阻放电,会产生多余的热量,降低电池组的整体性能和寿命。主动均衡通过储能元件在电池间传递能量,主要分为电容型均衡,电感型均衡,变压器型均衡和变换器型均衡。电感型均衡以电感为能量传递元件,具有能耗低,结构简单,效率高的优点^[2-3]。然而当串联电池数量较多或均衡距离较远时,电感型均衡时间较长且效率较低。变压器型均衡电路以变压器为能量传递的桥梁,结构简单,易于扩展,同时具有良好的电气隔离效果^[4-8],是目前研究的热点之一。基于 Buck-

收稿日期:2020-12-18

^{*} 基金项目:国家自然科学基金-青年基金(61701044)、陕西省重点研发计划(2019ZDLGY15-04-02)项目资助

Boost 电路的均衡结构,动作灵敏、开关迅速^[9-10],常与变压器、电感、电容等元件组合起来构成主动均衡系统,但开关数目较多,整体结构复杂。

为了减少均衡时间、提高均衡效率,本文采用电感和变压器相结合的方法,设计了一种分层均衡的拓扑结构。该结构不仅具有电感式均衡电路快速且稳定均衡的特点,而且有良好的电气隔离效果,保证了电池组的整体安全。同时,该结构模块化程度高、易于拓展。本文以电池的荷电状态(state of charge, SOC)为均衡指标,建立均衡电路仿真模型,通过实验验证了该结构可以实现快速、稳定均衡的目标,降低电池组容量的不一致性。

1 均衡电路结构及原理

目前,光伏电站储能一般采用磷酸铁锂电池且需要大量电池串联使用,单体电池容量的不一致性会造成储能系统整体性能下降,因此必须采取措施对电池组进行均衡管理。

本文利用反激式变压器和电感设计了一种新型主动均衡系统,电路拓扑结构如图1所示。其中, $B_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为单体电池, $S_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 和 $M_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为 MOSFET 开关管, $T_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为反激式变压器, C 为滤波电容, L 为储能电感。

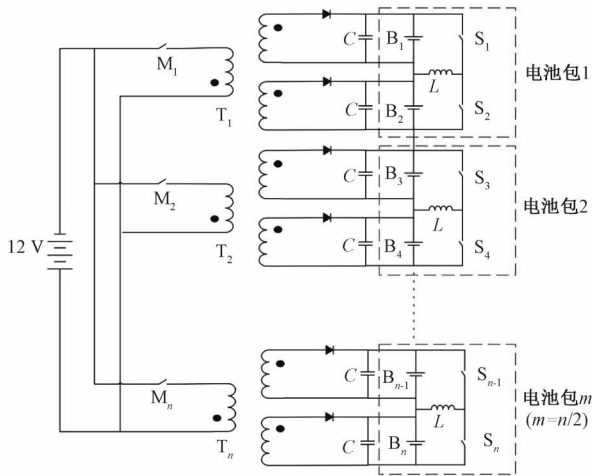


图1 新型均衡电路结构

该均衡系统采用组内均衡和组间均衡相结合的方式,电池包内相邻的锂电池通过电感式主动均衡电路实现能量均衡,不同电池包之间利用反激式变压器实现组间充电均衡。

1.1 组内均衡电路

以图1中的电池包1为例,说明组内均衡电路的工作原理。如图2所示,每个电池包由两节单体电池组成,采用电感式主动均衡的方法。由于只有两节单体电池,所以能量转移只在这两节单体电池之间进行,避免了能量的远距离传输消耗,提高了能量的传输效率。

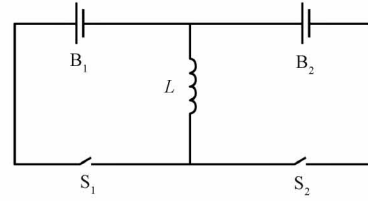


图2 组内均衡电路

假设电池 B_1 的能量高于电池 B_2 的能量。首先,控制开关 S_1 闭合, S_2 断开,将电池 B_1 中多余的能量转移到电感 L 上,如图3所示。

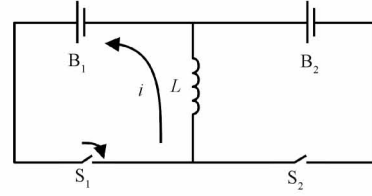


图3 能量从电池 B_1 转移到电感 L

当电感 L 储能完毕后,断开 S_1 ,闭合 S_2 ,如图4所示。根据楞次定律,电感 L 上的电流方向不变,大小逐渐降低,能量通过闭合回路不断地传递给电池 B_2 ,直至电流 i' 降为0。组内均衡结束后,电池 B_1 和 B_2 的电量趋于一致。

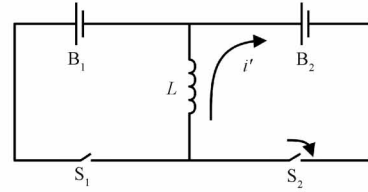


图4 能量从电感 L 转移到电池 B_2

1.2 组间均衡电路

组间均衡是在不同电池包之间进行的,通过反激式变压器,外部电源为每一个电池包进行不同程度的充电。文献[4]中将整个锂电池组接入反激式变压器的原边为单体电池进行充电,就会存在单体电池又放电又充电的矛盾,浪费电池的充放电循环寿命。采用外部12V电源,只对电池包进行充电,不对电池包进行放电,充满后立即停止均衡。这样不仅保护了电芯,确保了电池的最佳容量,还最大程度的延长了电池的充放电循环寿命。同时,通过调节图1中反激式变压器原边开关 $M_i (i = 1, 2, 3, \dots)$ 的占空比来控制相应电池包的充电速率,使电量低的电池包充电速率加快,节省了充电时间。

如图5所示,12V的外部电源通过反激式变压器给电池包1进行充电。反激式变压器的原边接12V的外部电源,两个副边分别接单体电池 B_1 和 B_2 。二极管的接入是为了防止单体电池放电对变压器副边造成影响。组间均衡时,闭合 M_1 ,断开 S_1 和 S_2 。由于两个副边绕组的励磁电感和匝数比是相同的,因此流过单体电池 B_1 的电流 I_1 和流

过单体电池 B_2 的电流 I_2 是相同的,保证了电池包 1 中 B_1 和 B_2 两节单体电池的充电速率一致,同时充满电。

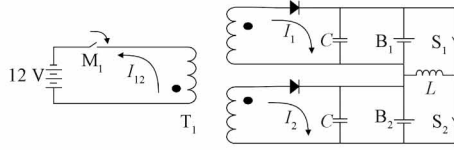


图 5 电池包 1 充电均衡

2 均衡电路参数计算

根据均衡电路的结构和原理,需要对反激式变压器的励磁电感 L_m 、变压器的原副边匝数比 n 、组内均衡电感 L 、开关 $M_i (i=1,2,3,\dots)$ 的占空比等数值进行计算和设定。

2.1 组间均衡参数计算

假设 V_{in} 为反激式变压器的原边电压、 V_o 为反激式变压器的副边电压、 I_{peak} 为原边电流峰值、变压器原边开关管 $M_i (i=1,2,3,\dots)$ 的开关频率为 f_s 、变压器原副边能量传递效率为 η 。根据能量守恒定律及功率计算公式可知:

励磁电感 L_m 从变压器原边获得的能量为:

$$W = \frac{1}{2} I_{peak}^2 L_m \quad (1)$$

由于周期 $T = \frac{1}{f_s}$, 可知励磁电感 L_m 的功率为:

$$P = \frac{1}{2} I_{peak}^2 \cdot L_m \cdot f_s \quad (2)$$

由 $\frac{di}{dt} = \frac{V_{in}}{L_m}$ 可得:

$$I_{peak} = \frac{V_{in}}{L_m} \cdot T_{on} \quad (3)$$

式中: T_{on} 为 MOSFET 管导通时间; T_{off} 为 MOSFET 管关断时间。联立式(2)和(3),可求得励磁电感 L_m 为:

$$L_m = \frac{V_{in}^2 \cdot T_{on}^2 \cdot f_s}{2P} \quad (4)$$

假设 I_{12} 为原边电流, I_1 为流过电池 B_1 的副边电流, L_{eq} 为变压器副边的等效电感。根据能量守恒定律,可得:

$$\frac{1}{2} L_m I_{12}^2 = \frac{1}{2} L_{eq} I_1^2 \quad (5)$$

$$\frac{I_{12}}{I_1} = \frac{1}{n} \quad (6)$$

联立式(5)和(6)可得:

$$L_{eq} = \frac{L_m}{n^2} \quad (7)$$

联立式(3)和(7)可得:

$$n I_{peak} = \frac{V_o}{L_{eq}} \cdot T_{off} \quad (8)$$

联立式(7)和(8)可得变压器原副边匝数比 n 为:

$$n = \frac{I_{peak} \cdot L_m}{V_o \cdot T_{off}} \quad (9)$$

2.2 组内均衡参数计算

由于 MOSFET 开关管的频繁通断,会产生损耗,同时为了提高效率和降低电感的磁复位,应该将系统设计为断续电流工作模式(DCM)。为了减小电路元件的尺寸,降低电路的功耗,将组内均衡系统的开关频率设置为 2 kHz。

对于电感充电储能回路,充电均衡电流为:

$$i_L = \frac{V}{L} \cdot \frac{D}{f} \quad (10)$$

式中: i_L 为均衡电流; f 为开关频率; V 为均衡单体电池的电压。根据 i_L 的预设值和占空比 D , 可以计算出电感 L 的值为:

$$L = \frac{V}{i_L} \cdot \frac{D}{f} \quad (11)$$

2.3 MOSFET 开关管的选择

MOSFET 开关管为全可控器件,分为 NPN 型 MOSFET 和 PNP 型 MOSFET 两种。对于 MOSFET 管的选择可从电压应力、漏极电流、驱动要求和功率损耗等方面进行考虑。锂电池的电压范围一般在 3.7~4.2 V 之间,组内均衡电路的电压要求应为两节单体电池电压之和,即电压等级应该在 8.4 V 以上。为了应对均衡电流的尖峰值过大, MOSFET 管的电流上限选取应该在 8 A 以上。同时,为了减少开关管的功率损耗,防止开关管过热,应该选择导通内阻较小、开关延迟时间少的 MOSFET 管。

3 均衡电路控制策略

电池均衡的效果通常采用端电压、电池剩余电量或 SOC 作为指标来进行衡量。在端电压、电池剩余容量和 SOC 中,端电压是最好测量的,也是电池单体之间最直接的差异反映,但是电压受工作条件等因素影响较大,难以提供准确的参数用于均衡系统。文献[11]中用电压作为均衡判据,从部分实验数据对比可知,在锂电池处于平台期(即 SOC 为 20%~80%)时, SOC 随着电压的变化幅度不明显。因此,某些存在电压平台期的电池并不适合选用电压作为均衡指标。以单体电池的剩余电量作为均衡指标时,无法实现实时的数据更新,有一定的局限性。电池的 SOC 受电池工作状态的影响较小,能较为准确的反映电池的内部状况^[12-15]。因此,本文以 SOC 作为均衡指标。

首先,进行组内均衡,具体流程如图 6 所示。组内均衡结束后,将 12 V 的外部电源接入电池组,对电池组进行充电,并进行组间均衡。具体流程如图 7 所示。

4 仿真实验和分析

根据上述电路的均衡原理和控制策略,以 6 节串联锂电池组为例,使用 Simulink 软件搭建仿真模型。电池模块选用 Simscape 库中的 battery 模型,类型选用锂电池,额定容量设置为 6 Ah,额定电压设置为 4.2 V。

4.1 模型建立及参数设置

如图 8 所示,每两节单体锂电池组成一个电池包,电感 L 的参数值设置为 10 mH。

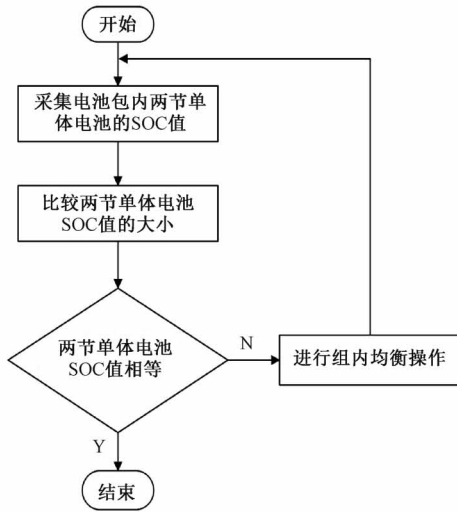


图6 组内均衡流程

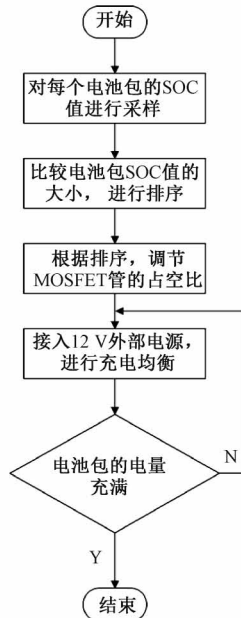


图7 组间均衡流程

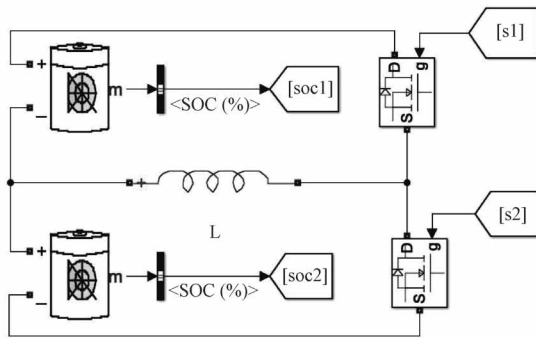


图8 电池包仿真模型

组内均衡的控制逻辑如图9所示,通过比较两节单体

电池SOC值的大小,使能量从高电量的电池转移给低电量的电池。组间均衡时,12V的外部电源通过变压器为电池包进行充电,如图10所示。反激式变压器的励磁电感 L_m 设置为 $27\mu\text{H}$,变压器的原副边变比 $n=67:1$ 。滤波电容 C 的参数设置为 $100\mu\text{F}$ 。MOSFET开关管的频率为 2kHz ,其他参数采用默认值。

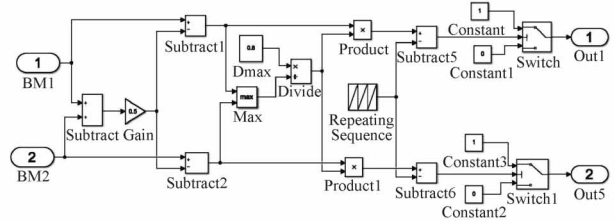


图9 组内均衡控制

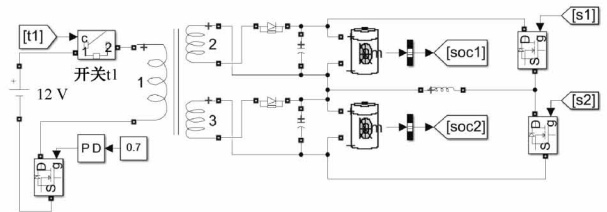


图10 组间充电均衡模型

为了体现本方案在电池充电末期均衡的效果,选用6节电量即将充满的单体电池组成串联电池组,对其进行充电均衡,使每节单体电池都充满电且不造成过充现象的发生。设置6节单体电池的SOC值如表1所示。Battery1和Battery2组成电池包1,Battery3和Battery4组成电池包2,Battery5和Battery6组成电池包3。

表1 各单体电池SOC值

电池编号	SOC值/%
Battery1	99.9
Battery2	99.6
Battery3	99.7
Battery4	99.4
Battery5	99.8
Battery6	99.5

4.2 试验结果及分析

1)组内均衡试验及结果分析

首先,利用电池包内的电感进行组内均衡。电池包1组内均衡时,流过Battery1和Battery2的电流情况如图11所示。图11(a)中流过Battery1的电流为正,说明Battery1处于放电状态,Battery1将能量传递给电感 L ;图11(b)中流过Battery2的电流为负,说明Battery2处于充电状态,Battery2从电感 L 中不断地获得能量。当Battery1和Battery2的SOC值一致时,组内均衡结束。

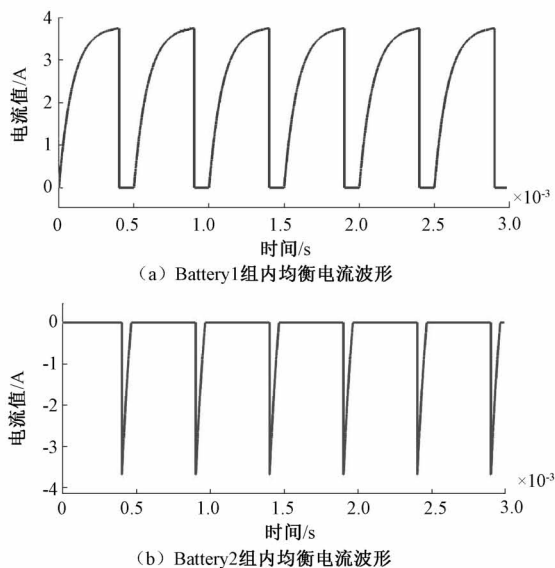


图 11 电池包 1 组内均衡电流波形

同理,可知电池包 2 和电池包 3 的组内均衡情况。组内均衡结束时,3 个电池包各自的均衡情况如图 12 所示。

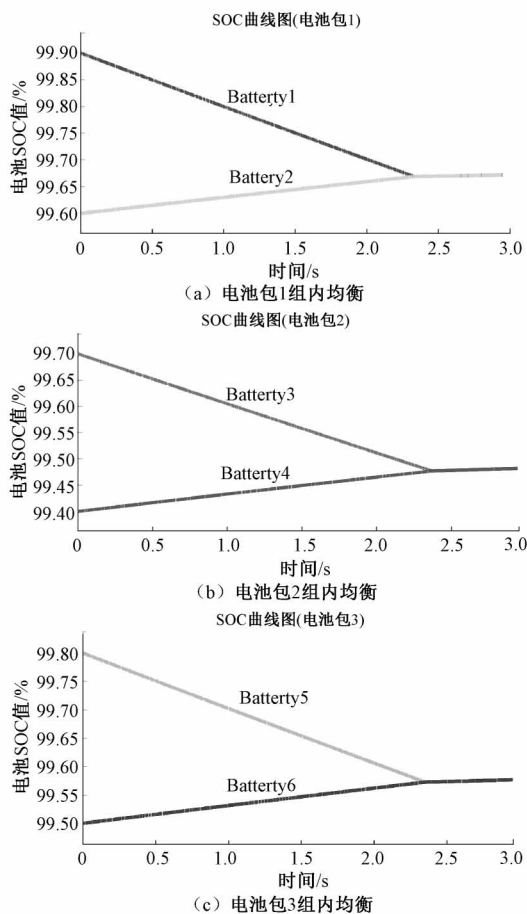


图 12 电池包组内均衡

从图 12 中可以明显看出 3 个电池包只用了不到 3 s 的时间,就完成了组内均衡。经过组内均衡后,电池包 1 中两节单体电池的 SOC 值为 99.66%、电池包 2 中两节单体电池的 SOC 值为 99.48%、电池包 3 中两节单体电池的 SOC 值为 99.57%,均衡效果显著。

2) 组间均衡及实验结果分析

太阳能发电系统中,需要根据直流负载的工作电压或交流逆变器的配置确定蓄电池的工作电压。通常,蓄电池的工作电压为 12、24、48、110 V 等。以工作电压为 12 V 的蓄电池为例,对电池组进行组间均衡。将 12 V 的外部电源接入电池组,对电池组进行充电。

当电池包内的电量达到一致后,开始进行组间均衡。组间均衡时,为了防止充电电压过大,12 V 的外部电源通过反激式变压器转换为 4 V 左右的电压为电池包进行充电,变压器副边的电压情况如图 13 所示。

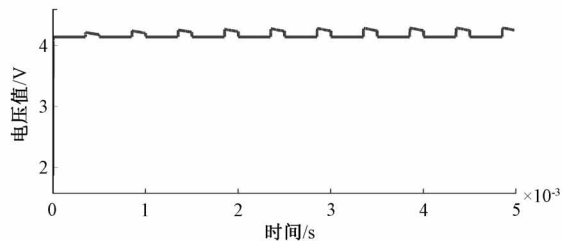


图 13 变压器副边电压

经过组内均衡后,电池包 2 中单体电池的 SOC 值为 99.48% < 电池包 3 中单体电池的 SOC 值为 99.57% < 电池包 1 中单体电池的 SOC 值为 99.66%, 3 个电池包各自对应的原边 MOSFET 开关管为 M_1 、 M_2 、 M_3 。为了加快整个电池组的充电速率,需要设置 M_2 的占空比 $> M_3$ 的占空比 $> M_1$ 的占空比。

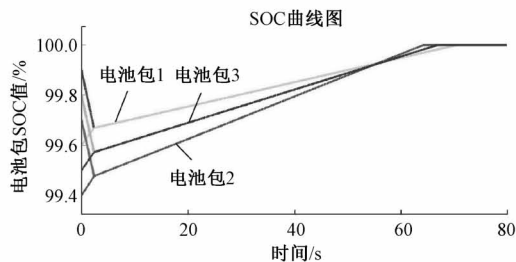


图 14 组间充电均衡

如图 14 所示,前 3 s 的时间为电池包 1、电池包 2、电池包 3 的组内均衡。由于电池包 2 的充电速率最快,所以电池包 2 所对应的曲线斜率最大,最早充满电。当电池包 2 充满电后,其所对应的原边 M_2 开关管立即断开,防止过充现象的发生。随后,电池包 3 充满电,原边 M_3 开关管立即断开。最后,电池包 1 充满电,原边 M_1 开关管立即断开。经过 70 s 后,3 个电池包内的单体电池 SOC 值都达到了 100%,充电结束。

电池包组间均衡时,通过调节变压器原边 MOSFET

开关管的占空比大小,加快充电速率,在最短的时间内使整个电池组达到了满电状态。同时,由于每个电池包充电是独立进行的,不会造成过充现象的发生,保证了单体电池的安全。

5 结 论

针对储能电站中锂电池组不一致性问题,本文采用反激式变压器和电感设计了一种新型主动均衡电路。该电路采用分层均衡的方式,将电感快速均衡的优点与变压器具有电气隔离的特性结合起来。通过建立仿真电路模型,进行仿真实验。结果表明,经过 70 s 的均衡后,6 节单体锂电池的 SOC 值均达到了 100%,均衡用时短,均衡效率高,验证了均衡结构的有效性。同时,通过在组间均衡电路中加入占空比可调节的开关管,控制每个电池包的充电速率,进一步缩短了均衡时间。该系统还可以防止电池过度充电的发生,并且结构紧凑,便于模块化拓展。尽管本方案已得到初步验证,但仍需完善,如进一步优化系统结构、提高均衡效率等方面需要继续深入研究。

参考文献

- [1] 陈阳,杨文荣,冉峰,等. 太阳能充电的锂电池双向主动均衡模块设计[J]. 电源技术, 2018, 42(6): 895-897, 917.
- [2] LEE S W, LEE K M, CHOI Y G, et al. Modularized design of active charge equalizer for Li-Ion battery pack[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(11): 1-1.
- [3] 戴海峰,魏学哲. 电动汽车用锂离子动力电池电感主动均衡系统[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(10): 1547-1553.
- [4] 郭向伟,耿佳豪,卜旭辉,等. 基于反激变换器的串联电池组新型均衡方法研究[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 979-985.
- [5] LEE K M, LEE S W, CHOI Y G, et al. Active balancing of Li-Ion battery cells using transformer as energy carrier[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017(2): 1-1.
- [6] 翟二宁,滑娟,崔晓宇,等. 动力电池组主动均衡系统设计与实现[J]. 电源技术, 2020, 44(2): 249-252.
- [7] 李勇琦,陈满,伍科,等. H 桥级联电池储能系统四级均衡控制研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(5): 1291-1297.
- [8] 叶凌云,朱幸,黄添添,等. 变压器分立的动力电池组主动均衡技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7): 83-91.
- [9] 刘征宇,武银行,李鹏飞,等. 基于 Cuk 斩波电路的电池组均衡方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 233-241.
- [10] 刘征宇,许亚娟. 基于 Buck-Boost 电路的分层均衡方案[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 87-94.
- [11] ZHENG L, ZHU J, WANG G. A comparative study of battery balancing strategies for different battery operation processes[C]. Transportation Electrification Conference and Expo ITEC, 2016: 1-5.
- [12] 张博,刘皓明,张金波. 基于 DC/DC 变换器的储能电站锂电池快速均衡策略[J]. 电子测量技术, 2019, 42(20): 1-5.
- [13] 郭向伟,刘震,耿佳豪,等. 基于 LC 储能的串联电池组主动均衡方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 242-251.
- [14] 焦亚田,谢长君. 电动汽车锂电池组高效主动均衡的研究与测试[J]. 汽车工程, 2017, 3(8): 858-863.
- [15] MCCURLIE L, PREINDL M, EMADI A. Fast model predictive control for redistributive lithium ion battery balancing [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64(2): 1-1.

作者简介

巫春玲,硕士生导师,工学博士,主要研究方向为储能锂电池管理系统研究。

E-mail: wuchl@chd.edu.cn