

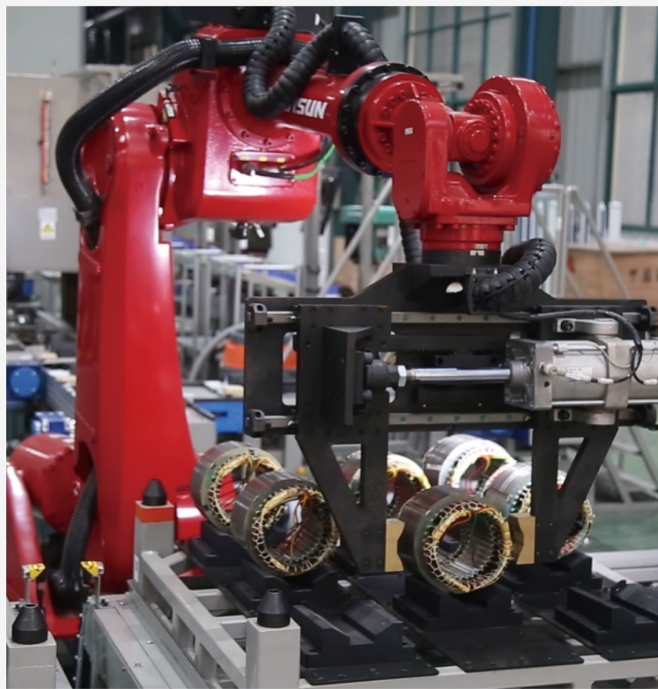
本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

司少康, 胡治国, 张磊冲.
基于耦合电感型双层Cuk斩波电路的
电池均衡系统.
电机与控制应用, 2022, 49(2): 77.



中国智能制造系统解决方案供应商联盟 (成员)
上海智能制造系统解决方案供应商 (首批)

电机 · 智能制造



咨询服务

规划设计

设计制造

信息化系统

项目实施



扫码联系
我们

联系人: 黄先锋 手机: 13501892388
上海电器科学研究所 (集团) 有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司
上海市武宁路505号9号楼6层

基于耦合电感型双层 Cuk 斩波电路的 电池均衡系统*

司少康, 胡治国, 张磊冲

(河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 电池在串联成组使用时, 由于制造工艺、工作环境不同等因素, 电池之间荷电状态(SOC)和电压存在不一致的问题。为解决该问题提出了一种基于耦合电感型双层 Cuk 斩波电路电池均衡系统, 用耦合电感代替非耦合电感, 比传统 Cuk 斩波电路减少了元器件数量, 降低了损耗, 提高了均衡效率。同时, 该均衡系统使用 N 沟道 MOSFET, 由同步触发脉冲 PWM 中一对互补信号控制。通过电路理论分析, 设计了完整的均衡电路, 最后在 MATLAB/Simulink 中进行仿真, 结果验证了该均衡系统的高效性。

关键词: 耦合电感; Cuk 斩波电路; MOSFET; PWM 脉冲信号

中图分类号: U469.72; TM912 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)02-0077-06

doi: 10.12177/emca.2021.169

Battery Equalization System Based on Coupled Inductor Double-Layer Cuk Chopper Circuit*

SI Shaokang, HU Zhiguo, ZHANG Leichong

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: When batteries are used in group, the states of charge (SOCs) and voltages are inconsistent between single batteries due to different manufacturing processes and working environments. In order to solve this problem, a battery equalization system based on coupled inductor double-layer Cuk chopper circuit is proposed, in which the coupled inductor is used instead of the uncoupled inductor. Compared with the traditional Cuk chopper circuit, it reduces the number of components, lowers the loss and improves the equalization efficiency. At the same time, the equalization system uses the N-channel MOSFET, which is controlled by a pair of complementary signals in synchronous trigger pulse PWM. Through the circuit theoretical analysis, a complete equalization circuit is designed. Finally, simulation is carried out in MATLAB/ Simulink. The results verify the efficiency of the equalization system.

Key words: coupled inductor; Cuk chopper circuit; MOSFET; PWM pulse signal

0 引言

近些年来, 环境污染日益严重。因此, 国家逐渐向新能源汽车方面进行政策倾斜, 新能源汽车是未来汽车的主要发展方向。电动汽车的电池通常由许多单体电池串并联成组使用^[1]。受电

池材料和制造工艺影响, 单体电池之间因其内阻、容量、自放电率等差异, 导致各单体电池之间出现不一致的问题^[2-3], 从而影响电池组的整体性能。

为解决电池不一致的问题, 国内许多学者提出了很多均衡拓扑方法, 文献[4]提出以 Buck-Boost 变换器为基础的电压均衡的复合式电路拓

收稿日期: 2021-10-06; 收到修改稿日期: 2021-12-21

* 基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(19A470001)

作者简介: 司少康(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车电池管理系统。

胡治国(1976—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为电力电子与电气传动。(通信作者)

扑。其在静态和充放电状态下均衡速度明显提升,但只适用于相邻电池间。文献[5]提出集中式变压器均衡拓扑,每个单体电池间都有一个变压器,均衡效率高,但结构复杂,需要元器件多且体积大不易控制。文献[6]提出 Cuk 斩波电路均衡拓扑。均衡能量在相邻单体间进行转移,在串联电池数目较少时均衡效果好。但在单体电池数目多时,均衡能量需经过多次转移才能抵达低能量电池,均衡效率低。

对上述学者研究内容进行分析及总结,本文提出了基于耦合电感型双层 Cuk 斩波电路的电池组均衡系统,其只需 n 个 MOSFET 管控制 n 节电池,耦合电感代替非耦合电感,电感与电容使用数量比传统 Cuk 斩波电路减少了一半。传统 Cuk 均衡电路在两个相邻电池间传输能量需要较长均衡时间,特别是在大规模串联电池组中,但本文提出的均衡电路克服了这个问题,所有的电感共用一个磁芯,降低了电路的复杂度,使电路更具成本效益,易于实现。

1 均衡系统及工作方式

1.1 均衡系统拓扑结构

图 1 所示是来自文献[7]的传统 Cuk 斩波电路,其由 n 节电池、 $2n-2$ 个 MOSFET 管、 n 个电感 L 、电容 C 组成。图 2 是本文提出的基于耦合电感的 Cuk 斩波电路电池均衡系统,其结构为 n 节电池配 n 个 MOSFET 管、2 节单体电池共用一个耦合电感 L 和一个电容 C ,所有的耦合电感共用一个磁芯。由于采用了电感间互有耦合,电路在换路时,还能提供瞬时感性能量的传递。

1.2 均衡系统工作方式

以 4 节电池为例,第一层均衡电路的工作过程可分为两种模式。

第一种工作模式,如图 3(a) 所示, MOSFET 管 VT1、VT3 导通时,电容 C_1 、 C_3 中的能量通过 VT1、VT3 转移至电池 B_2 、 B_4 上,单体电池 B_1 、 B_3 与耦合电感 L_1 、 L_3 形成回路将能量转移至耦合电感 L_1 、 L_3 中。当 MOSFET 管 VT1、VT3 关断时,二极管 VD2、VD4 正向导通,其电流回路如图 3(b) 所示,单体电池 B_1 与耦合电感 L_1 、电容 C_1 ,单体电池 B_3 与耦合电感 L_3 、电容 C_3 形成回路,单体电池 B_1 、 B_3 和耦合电感 L_1 、 L_3 对电容 C_1 、 C_3 进行充电;

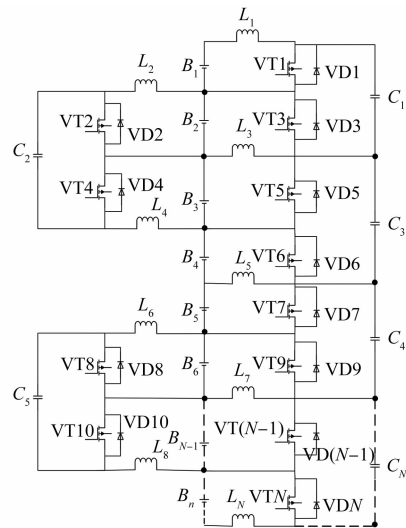


图 1 传统 Cuk 斩波均衡电路

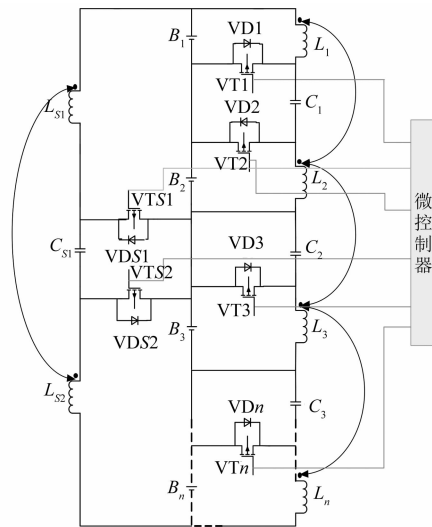


图 2 耦合电感的 Cuk 斩波均衡电路

单体电池 B_2 、 B_4 与耦合电感 L_2 、 L_4 、二极管 VD2、VD4 形成回路,单体电池 B_2 、 B_4 给耦合电感 L_2 、 L_4 充电。电路中的电感 L_1 的电流变化如图 3(c) 所示,在此周期内电池电压 u_{B1} 、 u_{B3} 可表示为

$$u_{B1} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + M_{12} \frac{di_{L2}}{dt} + M_{13} \frac{di_{L3}}{dt} \quad (1)$$

$$u_{B3} = L_3 \frac{di_{L3}}{dt} + M_{21} \frac{di_{L1}}{dt} + M_{23} \frac{di_{L3}}{dt} \quad (2)$$

M_{12} 是 L_1 与 L_2 间的互感, M_{13} 是 L_1 与 L_3 间的互感。同样,电池电压 u_{B2} 、 u_{B4} 可表示为

$$u_{B2} = -L_2 \frac{di_{L2}}{dt} - M_{21} \frac{di_{L1}}{dt} - M_{23} \frac{di_{L3}}{dt} + u_{C1} \quad (3)$$

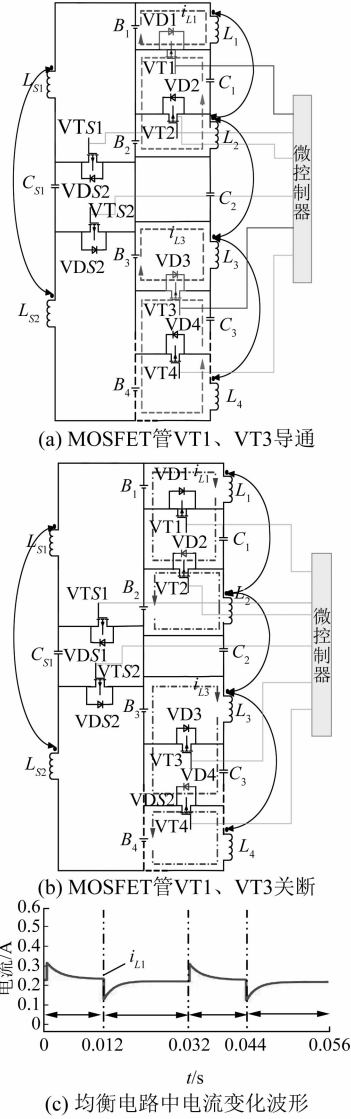


图3 奇数电池能量大于偶数电池

$$u_{B4} = -L_3 \frac{di_{L3}}{dt} - M_{31} \frac{di_{L1}}{dt} - M_{32} \frac{di_{L2}}{dt} + u_{C2} \quad (4)$$

u_{C1} 、 u_{C2} 、 u_{C3} 可表示为

$$u_{C1} = u_{B1} + u_{B2} \quad (5)$$

$$u_{C2} = u_{B2} + u_{B3} \quad (6)$$

$$u_{C3} = u_{B3} + u_{B4} \quad (7)$$

将式(1)~式(4)代入式(5)~式(7)可得:

$$u_{C1} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + M_{12} \frac{di_{L2}}{dt} + M_{13} \frac{di_{L3}}{dt} - L_2 \frac{di_{L2}}{dt} - M_{21} \frac{di_{L1}}{dt} - M_{23} \frac{di_{L3}}{dt} \quad (8)$$

$$u_{C2} = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} + M_{21} \frac{di_{L1}}{dt} + M_{23} \frac{di_{L3}}{dt} -$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} - M_{21} \frac{di_{L1}}{dt} - M_{23} \frac{di_{L3}}{dt} \quad (9)$$

$$u_{C3} = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} + M_{21} \frac{di_{L1}}{dt} + M_{23} \frac{di_{L3}}{dt} -$$

$$L_3 \frac{di_{L3}}{dt} - M_{31} \frac{di_{L1}}{dt} - M_{32} \frac{di_{L2}}{dt} \quad (10)$$

第二种工作模式,如图4(a)所示,VT2、VT4导通时,单体电池 B_1 、 B_3 与耦合电感 L_1 、 L_3 电容 C_1 、 C_3 组成闭环回路,电容 C_1 、 C_3 的能量通过闭环回路给单体电池 B_1 、 B_3 、耦合电感 L_1 、 L_3 充电。单体电池 B_2 、 B_4 给耦合电感 L_2 、 L_4 充电。当VT2、

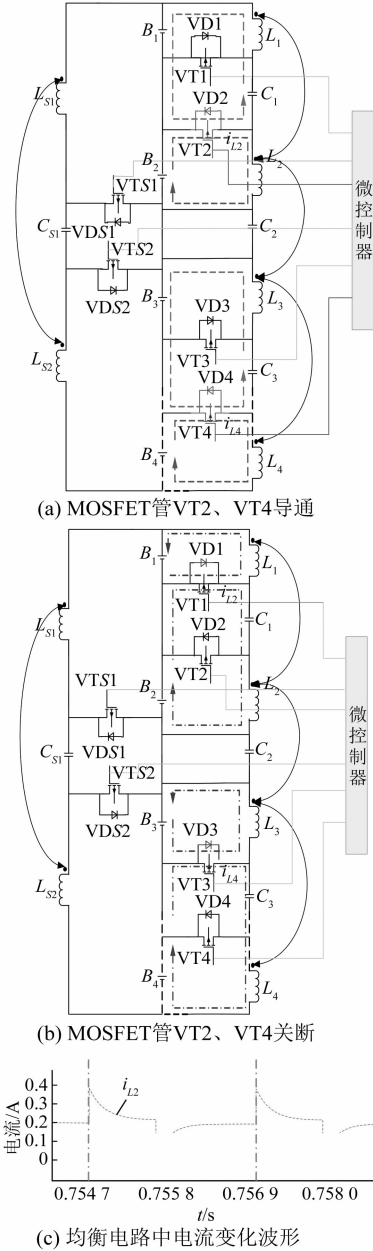


图4 偶数电池能量大于奇数电池

VT4 关断时,二极管 VD1、VD3 正向导通,其电流回路如图 4(b) 所示,单体电池 B_1 、 B_3 与耦合电感 L_1 、 L_3 、二极管 VD1、VD3 形成回路,单体电池 B_1 、 B_3 给耦合电感 L_2 、 L_4 充电;单体电池 B_2 与耦合电感 L_2 、电容 C_1 ,单体电池 B_4 与耦合电感 L_4 、电容 C_3 形成回路,单体电池 B_2 、 B_4 和耦合电感 L_2 、 L_4 对电容 C_1 、 C_3 进行充电。电路中的电感 L_2 的电流变化如图 4(c) 所示,在此周期内电池电压 u_{B2} 、 u_{B4} 可表示为

$$u_{B2} = -L_2 \frac{di_{L2}}{dt} - M_{21} \frac{di_{L1}}{dt} - M_{23} \frac{di_{L3}}{dt} \quad (11)$$

$$u_{B4} = -L_3 \frac{di_{L3}}{dt} - M_{31} \frac{di_{L1}}{dt} - M_{32} \frac{di_{L2}}{dt} \quad (12)$$

同理,电池电压 u_{B1} 、 u_{B3} 也可表示为

$$u_{B1} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + M_{12} \frac{di_{L2}}{dt} + M_{13} \frac{di_{L3}}{dt} \quad (13)$$

$$u_{B3} = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} + M_{21} \frac{di_{L1}}{dt} + M_{23} \frac{di_{L3}}{dt} \quad (14)$$

将单体电池 B_1 、 B_2 放在一起均衡的状态称为双层均衡电路,同理,将上文分析的 4 节单体电池两两一组进行均衡时,可把电池 B_1 、 B_2 视为一组,电池 B_3 、 B_4 视为另一组,这两组可通过 Cuk 斩波电路实现双单元均衡,其均衡电路如图 5(a) 所示。在第一层均衡结束后,若电池 B_1 、 B_2 组能量高于另一组电池 B_3 、 B_4 时, MOSFET 管 VTS1 导通,电池组 B_1 、 B_2 与 MOSFET 管 VTS1、耦合电感 L_{S1} 组成闭合回路,电池组 B_1 、 B_2 给耦合电感 L_{S1} 充电。电容 C_{S1} 对耦合电感 L_{S2} 与电池组 B_3 、 B_4 放电。当 MOSFET 管 VTS1 关断时,二极管 VDS2 正向导通,其电流回路如图 5(b) 所示,电池组 B_1 、 B_2 与耦合电感 L_{S1} 、电容 C_{S1} 、二极管 VDS2 组成回路,这时电池组 B_1 、 B_2 给耦合电感 L_{S1} 、电容 C_{S1} 充电。耦合电感 L_{S2} 给电池组 B_3 、 B_4 充电。最终,实现电池组 B_1 、 B_2 和电池组 B_3 、 B_4 这两组间的能量平衡。

2 均衡控制策略

均衡控制策略由控制算法实时计算单体电池间的能量状态,给予均衡电路提供实时有效的电池信息,以产生准确的 PWM 信号,控制均衡电路的实施^[8-10]。设定一个阈值差 $\partial = 2\%$,然后,根据检测系统检测到的单体电池的 SOC 值计算串联

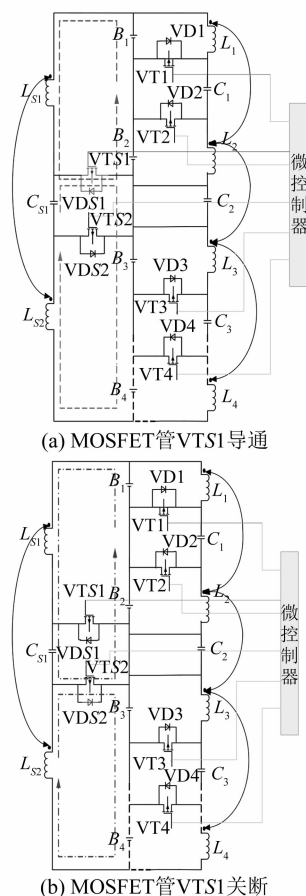


图5 电池组与电池组间的均衡过程

电池组中总平均值 $\overline{SOC}$,并给出计算式:

$$\overline{SOC} = \frac{SOC_{E1} + SOC_{E2} + SOC_{E3} + \dots + SOC_{En}}{n} \quad (15)$$

再把各个单体电池的 SOC 值与平均值 $\overline{SOC}$ 进行比较,即:

$$|SOC_{Ei} - \overline{SOC}| \geq \partial \quad (16)$$

均衡电路中任何一个单体电池荷电状态 SOC 满足式(16)时,均衡电路开始工作。

本文 MOSFET 管采用 N 沟道金属氧化物场效应晶闸管,与传统的 P 沟道相比,其优点是在相同的状态下 N 沟道 MOSFET 管能实现更低的漏源导通电阻和更低的电压降,减小了能量损耗。其控制信号波形图如图 6 所示,奇数编号的 MOSFET 管采用正相控制信号,偶数编号的 MOSFET 管采用反相控制信号。当奇数编号 MOSFET 管导通时,能量储存在电感中。在下一个阶段,偶数编号的 MOSFET 管导通时,储存在

电感中的能量循环通过各个电池单体,给电压低的电池充电直到能量平衡时均衡结束。控制器产生的开关频率为 30 kHz,考虑死区区间的存在,占空比为 45%。为保险起见,控制信号经过放大后采用光耦与 MOSFET 管进行隔离。

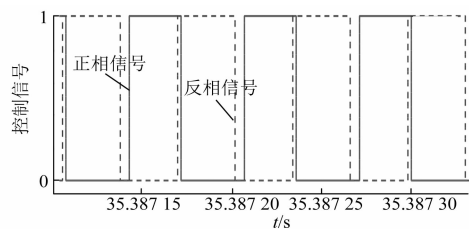


图 6 控制信号波形图

3 均衡系统仿真验证

为验证提出的均衡系统与均衡控制策略,选择4节电池在 MATLAB/Simulink 搭建如图7所示的均衡电路进行仿真。

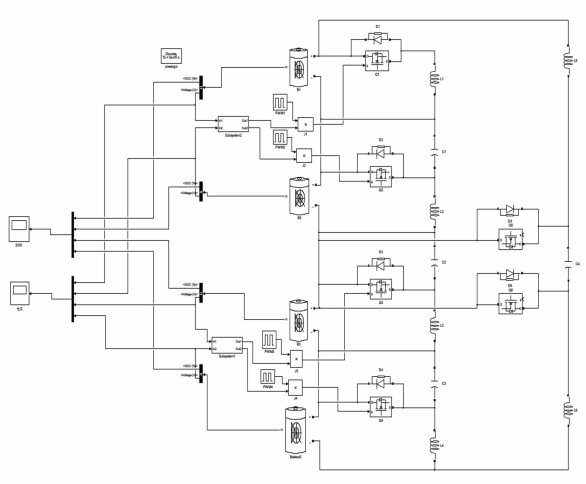


图7 均衡电路仿真

电池的标称电压为 3.7 V, 额定容量为 20 Ah, 磁化电感为 20 μ H, 内阻为 1 m Ω , 电容为 100 μ F。脉冲发生器采用同步触发模式, 频率为 30 kHz, 占空比为 45%。

4 节电池初始 SOC 值分别为 99%、98%、97%、96%。本文设置的仿真时间为 1 200 s。图 8 是耦合电感 Cuk 均衡电路的 SOC 仿真波形,其 SOC 值在 1 000 s 左右趋于一致, SOC 最大误差值从原来的 3% 下降至 0.15%。图 9 是传统 Cuk 均衡电路的 SOC 仿真波形,在相同的仿真条件下

SOC 值在 1 000 s 左右时,最大误差值从 3% 减小至 1.9%。通过与传统 Cuk 均衡电路的 *SOC* 仿真结果对比可知,耦合电感的 Cuk 均衡电路的均衡效率高且速度更快。

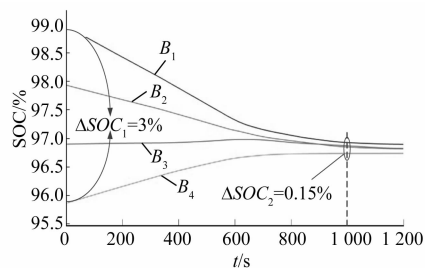


图 8 耦合电感的 Cuk 电路的 SOC 仿真波形

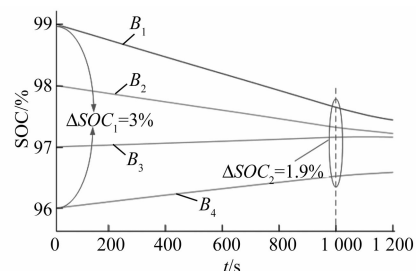


图 9 传统 Cuk 电路的 SOC 仿真波形

4 节电池初始电压值分别为 3.62、3.54、3.52、3.48 V。本文设置仿真时间为 1 200 s。其中图 10 为本文提出的耦合电感 C_{uk} 均衡电路的电压仿真波形,电池的初始电压在 1 000 s 左右时趋于一致,电压最大误差值从 0.13 V 下降至 0.012 V。图 11 是传统 C_{uk} 均衡电路的电压仿真波形,在相同的仿真条件下,电池初始电压在 1 000 s 左右时,电压最大误差值从 0.13 V 降至 0.05 V,电压最大误差值比本文提出的均衡电路大。

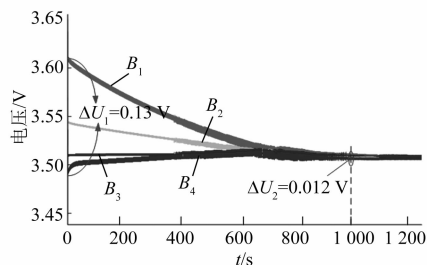


图 10 耦合电感 Cuk 电路的电压仿真波形

4 结 语

本文提出了基于耦合电感型双层 Cuk 斩波电路电池均衡系统,在 MATLAB/Simulink 中搭建

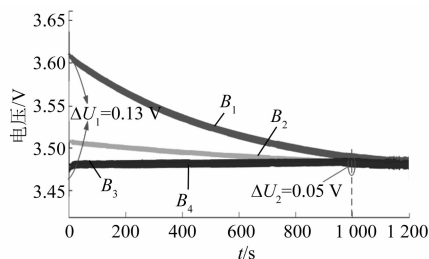


图 11 传统 Cuk 电路的电压仿真波形

仿真模型进行仿真验证,通过与传统的 Cuk 均衡系统对比分析可知,与传统均衡系统相比,本文提出的均衡系统在减小误差,提高均衡速度方面更具有效性。

【参考文献】

- [1] 胡治国,司少康. 新能源汽车电池管理方法综述[J]. 汽车文摘,2021(4): 1.
- [2] 郭杰,王小鹏,孙春霞,等. 动力电池串并联结构重组的均衡充电方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(5): 163.
- [3] FENG J, CHERNOVA NA, OMENYA F, et al. Effect of electrode charge balance on the energy

storage performance of hybrid supercapacitor cells based on LiFePO_4 as Li-ion battery electrode and activated carbon [J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2018, 22: 1063.

- [4] 李锐华,李冀,胡波,等. 基于 Buck-Boost 变换器的磷酸铁锂电池串联电压均衡优化策略[J]. 电气技术,2018,19(3): 1.
- [5] 吴铁洲. HEV 锂离子电池组管理关键技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2010.
- [6] 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.
- [7] 刘红锐,李园专,李思奇,等. 一种基于 Cuk 斩波电路的串联蓄电池均衡器的研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2016,41(2): 71.
- [8] 李小龙,徐顺刚,许建平,等. 一种单电感双向电池均衡电路[J]. 电机与控制学报,2019,23(4): 90.
- [9] 梅丘梅,罗扬帆,王华昕,等. 退役动力电池多变量均衡控制策略研究[J]. 电源技术,2021,45(3): 356.
- [10] 李建林,李雅欣,黄碧斌,等. 退役动力电池一致性评估及均衡策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(12): 1.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部

[主要栏目]

- | | | |
|--------------|-----------|-------------|
| · 控制与应用技术 | · 研究与设计 | · 故障诊断与保护 |
| · 新能源发电与局域电网 | · 新能源汽车技术 | · 发电机组及其控制 |
| · 测试技术与测控系统 | · 材料与工艺 | · 电机生产及质量管理 |
| · 电力电子变流器技术 | · 智能制造 | · 节能应用 |
| · 实用技术成果 | | |