

# 一种双超级电容倍压式串联蓄电池系统并行均衡器

刘红锐<sup>1</sup>, 张开翔<sup>1</sup>, 张彬<sup>1</sup>, 尹荣<sup>1</sup>, 钱晶<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘要:**传统电容式串行均衡器利用串联单体蓄电池间的电压差实现单体蓄电池间的串行均衡, 由于串联单体蓄电池之间电压差小, 该均衡器能量均衡效率低、均衡速度慢。为此, 提出一种双超级电容倍压式串联蓄电池系统并行均衡器, 该均衡器具有以下2种工作模式: 多个单体蓄电池并行均衡放电的双超级电容并联储能、多个单体蓄电池并行均衡充电的双超级电容串联释能。所提出的并行均衡策略能够极大地提高均衡速度, 同时双电容使电容均衡的储能能力加倍, 且均衡性能不受单体蓄电池间电压差小的限制。详细介绍了均衡器结构、工作原理和控制策略。搭建了4个串联锂离子蓄电池均衡器实验平台并设计了样机进行实验, 结果证明了所提均衡器的可行性与优越性。

**关键词:**双超级电容; 蓄电池; 储能; 倍压均衡; 并行均衡; 控制

**中图分类号:** TM 912

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16081/j.epae.202110040

## 0 引言

随着新能源政策的支持与技术的不断发展, 以蓄电池提供动力的电源设备日益繁多。目前常用的蓄电池主要有铅酸蓄电池、镍氢蓄电池、锂离子蓄电池, 锂离子蓄电池由于具有体积小、重量轻、循环寿命长、无记忆效应等优点而被广泛应用<sup>[1-2]</sup>。锂离子单体蓄电池的电压在3.6 V左右, 在使用中需要将多个锂离子蓄电池进行串联来满足用电设备的电压要求<sup>[3]</sup>。但锂离子蓄电池由于制造技术、材质和其他方面的差异, 会出现能量不一致的问题。因此, 研究性能优异的均衡器及均衡策略对延长蓄电池续航里程、提高蓄电池组储能能力有重要意义<sup>[4-5]</sup>。

目前, 均衡方法总体可分为能耗均衡与非能耗均衡。非能耗均衡以其均衡效率高等优点成为目前均衡器主要应用的方法。对于需要中小型串联蓄电池系统提供能量的设备, 目前有多种均衡方法, 如电容均衡法<sup>[6-9]</sup>、电感均衡法<sup>[10-11]</sup>、变压器均衡法<sup>[12-14]</sup>和基于基本斩波电路的均衡方法<sup>[15-17]</sup>。电容均衡法是利用单体蓄电池之间的电压差, 将电容作为储能载体, 实现能量转移, 但是在单体蓄电池之间电压差较小时, 能量转移效率明显降低; 电感均衡法以电感作为能量转移载体, 不同拓扑结构的均衡电路与均衡策略均会使均衡效率出现差异; 变压器均衡法多以反激变压器型为主, 均衡效率受变压器结构的影响较大; 基于基本斩波电路的均衡法将电感、电容作为

能量转移载体, 电感与电容在均衡电路中的不同组合可构成不同的Buck-Boost型均衡电路。其中, 电容均衡法的均衡速度快、均衡效率高, 但传统的电容均衡法存在一些缺点。如: 文献[6]提出的单电容集中式均衡器利用单个电容作为储能元件, 在一定程度上加快了均衡速度, 但是当电压差较小时, 均衡速度与均衡效率将受到较大限制; 文献[7]对传统飞度电容法进行改进, 给出了放电状态下的2种均衡控制策略, 增大了均衡电流, 提高了均衡速度, 适用于便携式设备。

本文提出一种双超级电容倍压式串联蓄电池系统并行均衡器, 适用于电动自行车、电动叉车等中小型串联蓄电池系统, 该均衡电路可以有效地解决单体蓄电池之间电压差较小导致的均衡速度大幅降低的问题。该均衡器可以将串联蓄电池系统中的多个单体蓄电池选中, 并对多个单体蓄电池同时充电或者放电, 进一步提高了整个均衡器的均衡速度。

## 1 均衡器结构与工作原理

### 1.1 均衡器结构

双超级电容倍压式串联蓄电池系统并行均衡器的拓扑结构如图1所示, 其由串联蓄电池组、开关矩阵、储能单元3个部分组成。其中, 串联蓄电池组由 $n$ 个单蓄体电池 $B_1, B_2, \dots, B_n$ 串联而成, 且相邻单体蓄电池间串联了带反并联二极管的MOSFET开关管T; 开关矩阵由 $2n$ 个开关组合构成, 开关 $S_{11} \sim S_{n1}$ 连接至总线1, 开关 $S_{12} \sim S_{n2}$ 连接至总线2, 相邻2个开关可以选通一个单体蓄电池; 储能单元由2个超级电容 $C_1, C_2$ 与开关管 $Q_1 \sim Q_6$ 构成; 总线1与总线2将被选通的单体蓄电池与储能单元构成回路, 同时实现多个单体蓄电池储存或释放能量。

在蓄电池组静置状态下, 串联开关管T均不动

收稿日期: 2021-05-13; 修回日期: 2021-09-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51967009, 51869007); 云南省教育厅科学研究基金资助项目(2019J0038)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51967009, 51869007) and the Scientific Research Foundation of Yunnan Education Department(2019J0038)

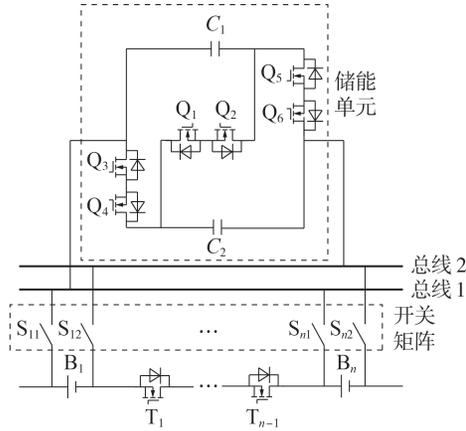


图1 均衡器拓扑图

Fig.1 Topology of equalizer

作,即处于截止状态,以此保证各单体蓄电池之间相互隔离。另外,为了保证蓄电池系统正常充放电的同时降低二极管的导通损耗,在蓄电池系统充放电状态下控制各串联开关管T处于导通状态。

### 1.2 均衡器工作原理

对于本文提出的均衡器,开关管 $Q_1$ 、 $Q_2$ 可以将电容串联,实现电容倍压释能,加快均衡速度;开关管 $Q_3$ — $Q_6$ 可以将电容并联,实现电容并联储能,增加储能元件的储能能力。该均衡器工作于系统静置状态时,可通过控制开关矩阵实现并行均衡,即选通多个高能量单体蓄电池同时向并联电容放电或倍压串联电容同时向多个低能量单体蓄电池放电的功能,最终快速达到各单体蓄电池电压一致的目的。

根据电容储能、释能的周期性变化,在一个周期 $T_s$ 内均衡器的工作模式可分为3种,储能电容的能量变化分析如下。

模态1( $[T_0, T_1]$ ):电容储能阶段。该阶段开关管 $Q_3$ — $Q_6$ 闭合,将储能电容并联,通过开关矩阵选通 $x$ 个高能量单体蓄电池,同时向并联的超级电容器释放能量,该阶段均衡器等效图如图2所示,图中 $R_{11}$ 、 $R_{12}$ 、 $\dots$ 、 $R_{x1}$ 、 $R_{x2}$ 为开关矩阵等效导通电阻。该阶段电容 $C_1$ 与 $C_2$ 的充电电流 $I_{in}$ 均为:

$$I_{in} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^x I_i \quad (1)$$

式中: $x$ 为串联蓄电池系统中蓄电池电压高于整个系统平均电压的单体蓄电池个数; $I_i$ ( $i=1, 2, \dots, x$ )为

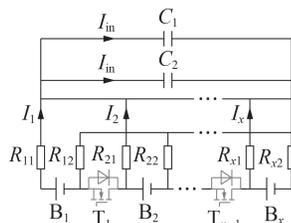


图2  $[T_0, T_1]$ 阶段均衡器等效图

Fig.2 Equivalent diagram of equalizer in  $[T_0, T_1]$  stage

第 $i$ 个单体蓄电池放电电流。

电容 $C_1$ 与 $C_2$ 储存的电荷 $Q^1$ 均为:

$$Q^1 = \int_{T_0}^{T_1} I_{in} dt \quad (2)$$

模态2( $(T_1, T_2)$ 和 $(T_3, T_4)$ ):死区阶段。该阶段开关管 $Q_1$ — $Q_6$ 全部断开,保证储能过程中所有动作开关均已断开,避免与释能阶段重合出现短路情况。该死区于程序中设定,保证开关管有足够的动作时间即可。

模态3( $[T_2, T_3]$ ):电容释能阶段。该阶段开关管 $Q_1$ 、 $Q_2$ 闭合,将储能电容串联,电容 $C_1$ 与 $C_2$ 实现倍压, $y$ 个低能量单体蓄电池通过开关矩阵选通,储能电容同时向各单体蓄电池释放能量,该阶段均衡器等效图如附录A图A1所示。该阶段电容 $C_1$ 与 $C_2$ 的放电电流 $I_{out}$ 为:

$$I_{out} = \sum_{i=1}^y I_i \quad (3)$$

式中: $y$ 为串联蓄电池系统中蓄电池电压低于整个系统平均电压的单体蓄电池个数。

电容 $C_1$ 与 $C_2$ 释放的总电荷 $Q^2$ 为:

$$Q^2 = \int_{T_2}^{T_3} I_{out} dt \quad (4)$$

## 2 控制策略

### 2.1 均衡控制策略

对于多数锂离子蓄电池,充电电流最大值应控制在 $0.5C_B$ 左右,其中 $C_B$ 为锂离子蓄电池容量。该均衡器通过串联电容向单个锂离子蓄电池充电的峰值电流 $I_{max}$ 为:

$$I_{max} = (V_C - V_L) / R_{all} \quad (5)$$

式中: $V_C$ 为电容 $C_1$ 与 $C_2$ 的总电压; $V_L$ 为单个锂离子蓄电池的初始电压; $R_{all}$ 为锂离子蓄电池与电容的总阻值。

因此需要对电容储能过程中电容的最高电压进行控制。在均衡器设计过程中,为了保证 $I_{max}$ 不超过锂离子蓄电池的正常充电范围,均衡器中加入电容电压采集模块,利用AMC1311隔离运算放大器实时采集单个电容两端电压,并通过TLV6001运算放大器将AMC1311输出的差分信号转换为单输出信号,最后通过ADC数据传输通道将数据传回主控芯片,当单个电容实时电压达到设定最高值 $V_1$ 时,主控芯片自动通过调节脉宽调制(PWM)环节来断开电容充电回路中的开关,实现电容储能的占空比自动可调。随着死区时间的结束,电容放电开关自动闭合,当单个电容实时电压低于设定最低值 $V_2$ 时,电容释能阶段结束并进入死区阶段。死区时间结束后,进入下一个周期的均衡。

单个电容的实时电压可由下式计算:

$$V_c/2 = V_0 + (E - V_0)[1 - e^{-t_{on}/(RC)}] \quad (6)$$

式中:  $V_0$  为电容初始电压;  $E$  为电容电压上限值;  $R$  为单个电容的内阻;  $C$  为单个电容的容值;  $t_{on}$  为电容在一个周期内的充电时间。

控制电容充电开关的 PWM 占空比  $\alpha$  为:

$$\alpha = t_{on}/T \quad (7)$$

式中:  $T$  为电容充电开关的 PWM 周期。

根据式(6)可以得到:

$$t_{on} = RC \ln \frac{2(E - V_0)}{2E - V_c} \quad (8)$$

结合式(7)进一步得到:

$$\alpha = \frac{RC \ln \frac{2(E - V_0)}{2E - V_c}}{T} \quad (9)$$

因此, 占空比  $\alpha$  根据电容初始电压  $V_0$  与电压上限值  $E$  自动变化。进而电容串联释放能量时, 单体蓄电池的充电电流不会超过正常范围。电容电压采集原理图如附录 A 图 A2 所示。图中, TLV6001 部分为典型的差分比例运算电路, 通过选择电阻值  $R_f$ 、 $R_d$ , 可以改变运算放大器的放大比例, 进而控制输出电压  $U_o$  的大小, 即:

$$U_o = \frac{R_f}{R_d} (V_{OUTP} - V_{OUTN}) \quad (10)$$

式中:  $V_{OUTP}$  为运算放大器同相输入端输入电压;  $V_{OUTN}$  为运算放大器反相输入端输入电压。

在电容电压采集过程中, 因 STM32F103 单片机的 ADC 口的电压不能超过 3.3 V, 所以需要对差分比例运算电路中的电阻值进行合理的选择, 保证通过 ADC 数据采集的电压值小于 3.3 V, 避免烧毁单片机。

## 2.2 电压采样策略

在均衡器工作过程中, 为了有效地管理蓄电池组的工作状态, 实时精确地监测单体蓄电池的工作电压, 保证各单体蓄电池电压一致时均衡器能及时停止工作。均衡器中采用 LTC6803 芯片设计了电压监测模块, 该芯片可实现 12 个单体蓄电池电压采集, 电压监测精度能达到 mV 级。单体蓄电池电压监测的原理图如附录 A 图 A3 所示。

LTC6803 芯片实时采集各单体蓄电池的电压, 利用 ADUM1401 数据隔离芯片, 与 STM32F103 主控芯片之间实现串行外设接口(SPI)通信。主控芯片通过串口与上位机连接, 并且每 0.5 s 向上位机传输一次电压数据。LTC6803 芯片的电压采集流程框图如图 3 所示。

根据 LTC6803 芯片的数据手册, 单体蓄电池电压  $V_{cellx}$  的计算公式为:

$$V_{cellx} = (C_x - 512) \times 1.5 \quad x = 1, 2, \dots, 12 \quad (11)$$

式中:  $C_x$  为 LTC6803 芯片获得的各个单体蓄电池的

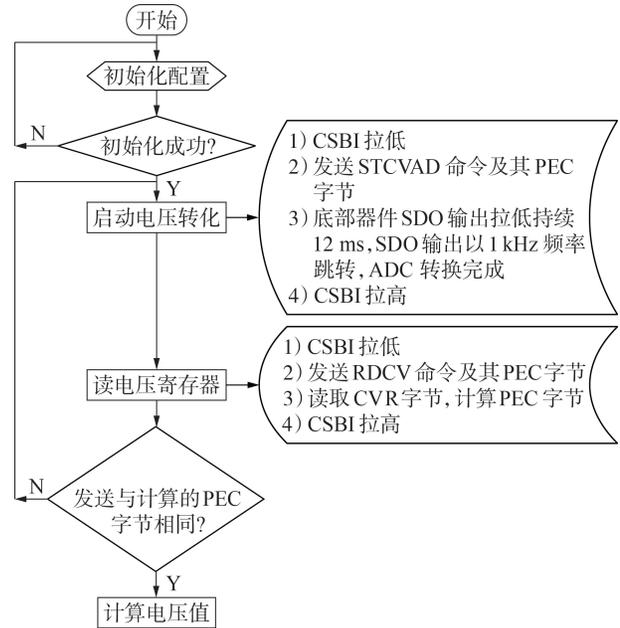


图 3 LTC6803 芯片电压采集流程图

Fig.3 Voltage acquisition flowchart of LTC6803 chip

12 位 ADC 测量值。

## 3 实验与分析

### 3.1 实验平台

为验证本文所提出的均衡器及其均衡策略的可行性与有效性, 搭建 4 个单体蓄电池的实验平台如附录 B 图 B1 所示, 单体蓄电池的额定电压为 3.2 V, 容量为 21 A·h。电容选择容值为 3 F、额定电压为 7.5 V 的超级电容器, 型号为 DRMH7R5305RX。均衡器中的主控开关采用导通电阻为 8 mΩ 的 N 沟道 MOSFET, 型号为 IRF3205。单体蓄电池参数监测模块包括电压监测模块、电流监测模块、温度监测模块。实验过程中, 采用电压均衡方式, 并利用电压监测模块实时监测各单体蓄电池电压, 采用 DS18B20 温度传感器来监测各单体蓄电池温度, 保证均衡器工作于正常温度范围。实验中 PWM 与均衡电流波形均由 MDO3024 数字荧光示波器捕获。此外, 实验平台还包括电压探头、电流探头与直流电源。

### 3.2 仿真对比分析

为了验证所提均衡器的优越性, 在 Simulink 上搭建了传统飞度电容均衡器与双超级电容倍压式均衡器的仿真模型并进行了对比分析。在 2 种均衡器中, 均采用 2 个单体蓄电池 ( $B_1$ 、 $B_2$ ) 进行对比实验, 各单体蓄电池参数一致, 电路中各元器件参数一致, 并采用同一控制策略。2 种均衡器的电路参数如表 1 所示, 均衡过程中单体蓄电池荷电状态(SOC)值变化波形如图 4 所示。图中, 虚线和实线分别对应单体蓄电池  $B_1$ 、 $B_2$  的 SOC 值。2 种均衡器中能量较少的单体蓄电池的充电电流波形如图 5 所示。

表 1 电路仿真参数

| 参数                       | 数值   |
|--------------------------|------|
| 电池容量 / (A·h)             | 21   |
| 电容 / F                   | 3    |
| 工作频率 / Hz                | 0.25 |
| 开关占空比                    | 0.5  |
| B <sub>1</sub> 的SOC值 / % | 40   |
| B <sub>2</sub> 的SOC值 / % | 35   |

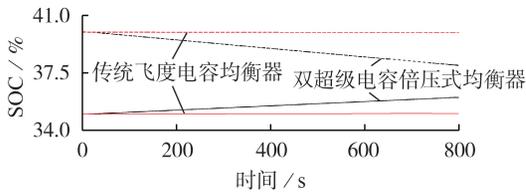
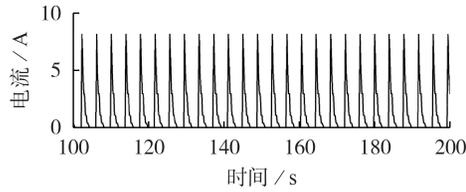
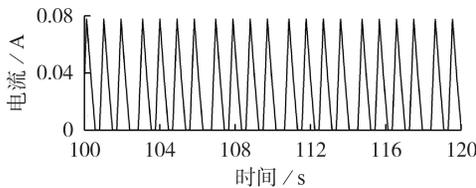


图 4 单体蓄电池 SOC 值变化波形

Fig.4 Change waveforms of SOC value of single battery



(a) 双超级电容倍压式均衡器



(b) 传统飞度电容均衡器

图 5 单体蓄电池充电电流波形

Fig.5 Waveforms of single battery charging current

仿真实验过程中,设定 2 个单体蓄电池之间的 SOC 差值为 5%,对于同一型号锂离子电池,2 个单体蓄电池的电压差很小。

由图 4 可以看出,经过 800 s 的均衡,双电容倍压式均衡器将 2 个单体蓄电池之间的 SOC 差值减小到 1.95%,而传统飞度电容均衡器中 2 个单体蓄电池之间的 SOC 差值为 4.91%,仅减小 0.09%。由图 5 可以看出,双超级电容倍压式均衡器给单体蓄电池充电的均衡电流峰值约为 8 A,传统飞度电容均衡器给单体蓄电池充电的均衡电流峰值约为 0.08 A。

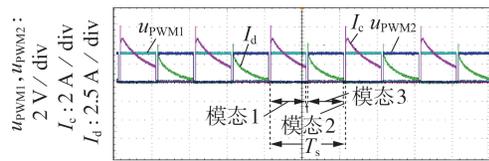
由此可以得出,当 2 个单体蓄电池的电压差较小时,本文提出的双超级电容倍压式均衡器有效地解决了传统飞度电容均衡器中单体蓄电池电压差较小导致的均衡速度慢、均衡效率差等问题。

### 3.3 均衡实验与分析

为验证上述分析与仿真的正确性,设计了 4 个串联锂离子电池的均衡器样机,样机如附录 B 图

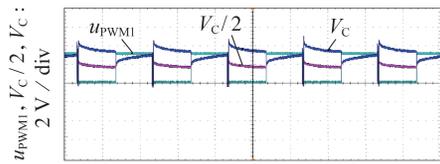
B2 所示。

实验过程中,因为采用容值为 3 F 的超级电容器,所以控制开关管的导通周期设置为 4 s,一方面可以降低开关管的损耗,另一方面可以加快均衡速度。并利用 Keil 编写电容电压采样程序,设置单个电容储能峰值电压为 3.1 V,单个电容释能最低电压为 1.5 V。实验过程中的相关波形如图 6 所示。图中, $u_{PWM1}$  为开关管 Q<sub>1</sub>、Q<sub>2</sub> 的驱动信号; $u_{PWM2}$  为开关管 Q<sub>3</sub>—Q<sub>6</sub> 的驱动信号; $I_c$  为蓄电池放电电流; $I_d$  为蓄电池充电电流; $V_c/2$  为单个电容电压。



时间: 2 s / div

(a) 蓄电池充放电电流与 PWM 波形



时间: 2 s / div

(b) 电容电压与 PWM 波形

图 6 实验相关波形

Fig.6 Experimental correlation waveforms

由图 6(a)可知:蓄电池放电电流峰值为 6.24 A,电池充电电流峰值为 5.5 A,均在蓄电池正常工作电流范围内;2 条 PWM 波形之间均设置了死区,为开关管动作保留了足够的时间。图 6(b)显示了蓄电池均衡阶段单个电容的电压变化情况与串联电容电压变化情况,可以看出当单个电容电压峰值达到 3.08 V 时,电容储能的相关开关管自动断开,电容释能,相关开关管自动闭合,当单个电容电压降至 1.48 V 时,电容继续储能,进而不断进行储能与释能过程,最终完成整个蓄电池系统的均衡。

4 个单体蓄电池的电压变化情况如图 7 所示。均衡前单体蓄电池 B<sub>1</sub>—B<sub>4</sub> 的电压分别为 3.288、3.304、3.256、3.232 V。从图 7 中可以看出,整个均衡过程共持续 25 min,电压差值减小约 0.065 V,均衡器在单体蓄电池间电压差很小的情况下均衡速度快,均衡效率高。同理,当单体蓄电池间电压差较大

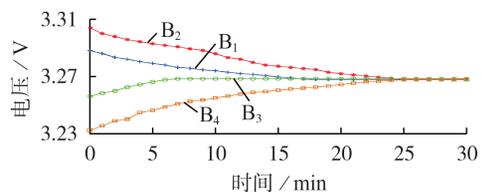


图 7 各个单体蓄电池电压变化情况

Fig.7 Voltage variation of each single battery

时,均衡速度与均衡效率将进一步得到提高。

#### 4 结论

本文提出了一种双超级电容倍压式串联蓄电池系统并行均衡器,适用于中小型蓄电池电源设备。该均衡器工作于串联蓄电池系统静置状态,具有并行均衡放电与并行均衡充电2种工作模式,能够实现多个单体蓄电池同时放电或者充电;采用双电容倍压方式,单体蓄电池之间的能力转移不再受电压差影响。本文详细分析了该均衡器的工作原理和控制策略,通过仿真与均衡实验2种方式,对所提均衡器的优越性与有效性进行了验证,并得出以下结论:双电容倍压式均衡器能够有效解决传统飞度电容均衡器在单体蓄电池间电压差较小时出现的均衡效率低的问题,极大地提高了均衡速度;并行均衡模式进一步加快了串联蓄电池系统中各单体蓄电池能量一致的速度。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

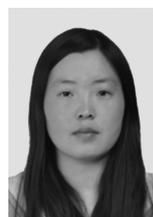
#### 参考文献:

- [1] 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):163-168.  
GUO Jie,WANG Xiaopeng,SUN Chunxia,et al. Balanced charging method of power batteries with reconstructed series-parallel structure[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(5):163-168.
- [2] HANNAN M A,HOQUE M M,HUSSAIN A,et al. State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications:issues and recommendations [J]. IEEE Access,2018,6:19362-19378.
- [3] HUA C C,FANG Y H,LI P H. Charge equalisation for series-connected LiFePO<sub>4</sub> battery strings[J]. IET Power Electronics,2015,8(6):1017-1025.
- [4] 刘畅,蔡旭,陈强. 链式电池储能系统的荷电状态复合均衡控制策略[J]. 电力系统自动化,2019,43(10):68-77.  
LIU Chang,CAI Xu,CHEN Qiang. Compound balancing control strategy of SOC for battery energy storage system based on cascaded H-bridge converter[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(10):68-77.
- [5] 陈舒钰,刘文华,赵香花,等. 注入无功功率的链式电池储能系统荷电状态均衡控制策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(8):83-91.  
CHEN Shuyu,LIU Wenhua,ZHAO Xianghua,et al. Balancing control strategy of state of charge for cascaded battery energy storage system with injection of reactive power[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(8):83-91.
- [6] 徐顺刚,文瑞强,周国华,等. 一种单电容集中式均衡电路[J]. 电机与控制学报,2020,24(3):1-10.  
XU Shungang,WEN Ruiqiang,ZHOU Guohua,et al. Single-capacitor centralized battery equalizer[J]. Electric Machines and Control,2020,24(3):1-10.
- [7] 赵汉宾,马锋,叶晓东,等. 基于改进型飞渡电容的电池组动态均衡控制方法研究[J]. 电子学报,2018,46(4):819-826.  
ZHAO Hanbin,MA Feng,YE Xiaodong,et al. Battery dynamic

balance control algorithm based on modified flying-capacitor [J]. Acta Electronica Sinica,2018,46(4):819-826.

- [8] ZHANG Huakai,WANG Yongfu,QI Han,et al. Active battery equalization method based on redundant battery for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2019,68(8):7531-7543.
- [9] SHANG Yunlong,ZHANG Qi,CUI Naxin,et al. An optimized mesh-structured switched-capacitor equalizer for lithium-ion battery strings[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification,2019,5(1):252-261.
- [10] 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):90-97.  
LI Xiaolong,XU Shungang,XU Jianping,et al. Single-inductor bidirectional battery equalizer[J]. Electric Machines and Control,2019,23(4):90-97.
- [11] LU Chusheng,KANG Longyun,WANG Shubiao. A novel symmetrical extensible battery balancing circuit based on inductor [C]//2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS). Jeju,Korea:IEEE,2018:2133-2136.
- [12] 张娥,徐成,王康丽,等. 电池组分段混合均衡控制策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):168-173.  
ZHANG E,XU Cheng,WANG Kangli,et al. Segmented hybrid equalization control strategy for battery packs[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(3):168-173.
- [13] SHANG Yunlong,XIA Bing,ZHANG Chenghui,et al. A modularization method for battery equalizers using multiwinding transformers[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2017,66(10):8710-8722.
- [14] 李玉,徐俊,彭程,等. 结合变压器正反激原理的动力电池主动均衡方法[J]. 西安交通大学学报,2019,53(8):151-158.  
LI Yu,XU Jun,PENG Cheng,et al. An active equalization technology for power batteries based on forward-flyback principle of transformers[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2019,53(8):151-158.
- [15] 刘红锐,张开翔,郭奕旋,等. 一种串联蓄电池系统多重多状态能量均衡器及其控制方法[J]. 电工技术学报,2020,35(增刊2):652-660.  
LIU Hongrui,ZHANG Kaixiang,GUO Yixuan,et al. A multi-state energy equalizer and control methods for series battery system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(Supplement 2):652-660.
- [16] LIU Kailong,YANG Zhile,TANG Xiaopeng,et al. Automotive battery equalizers based on joint switched-capacitor and Buck-Boost converters[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2020,69(11):12716-12724.
- [17] DAM S K,JOHN V. A modular fast cell-to-cell battery voltage equalizer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2020,35(9):9443-9461.

#### 作者简介:



刘红锐

刘红锐(1982—),女,山东德州人,副教授,博士,主要研究方向为电力电子与电力传动、电动汽车动力电池管理及均衡技术(**E-mail**:liuhongr888@163.com);

张开翔(1997—),男,四川绵阳人,硕士研究生,主要研究方向为电池管理系统及均衡技术(**E-mail**:zhang\_kx1026@163.com)。

(编辑 李莉)

## Parallel equalizer of double supercapacitors voltage doubling battery system

LIU Hongrui<sup>1</sup>,ZHANG Kaixiang<sup>1</sup>,ZHANG Bin<sup>1</sup>,YIN Rong<sup>1</sup>,QIAN Jing<sup>2</sup>

(1. Faculty of Electric Power Engineering,Kunming University of Science and Technology,Kunming 650500,China;

2. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering,Kunming University of Science and Technology,  
Kunming 650093,China)

**Abstract:** The traditional capacitive serial equalizer uses the voltage difference between series single batteries to realize the serial equilibrium between single batteries. Because the voltage difference between series single batteries is small, the equalizer has low energy equilibrium efficiency and slow equilibrium speed. For this, a parallel equalizer of double supercapacitors voltage doubling battery system is proposed. The equalizer has the following two working modes: parallel energy reserve of double supercapacitors by parallel equalizing discharge of multiple single batteries, and series energy release of double supercapacitors by parallel equalizing charge of multiple single batteries. The proposed parallel equilibrium strategy can greatly improve the equilibrium speed, the energy storage capacity of capacitor equilibrium is doubled through double supercapacitors, and the equilibrium performance is not limited by the small voltage difference between single batteries. The structure, working principle and control strategy of equalizer are introduced in detail. The experimental platform of four series lithium-ion battery equalizer is established and its prototype is designed, and the experimental results prove the feasibility and superiority of the proposed equalizer.

**Key words:** double supercapacitors; electric batteries; energy storage; voltage doubling equilibrium; parallel equalization; control

(上接第 112 页 continued from page 112)

## Day-ahead economic coordination dispatch model of electricity-heat microgrid considering P2H and fuel cells

CAI Qinqin,XIAO Yu,ZHU Yongqiang

(School of Electrical and Electronic Engineering,North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

**Abstract:** With the increasing proportion of wind and photovoltaic power in the micro-energy network, the development of diversified energy storage technologies will relieve the pressure of energy scheduling caused by the fluctuations of wind and solar energy. Therefore, it is proposed to combine P2H (Power to Hydrogen) with FC (Fuel Cell) as the flexible resource of electricity-heat microgrid to participate in the energy dispatch of microgrid. Under this background, the day-ahead economic coordination dispatch model of electricity-heat microgrid containing wind power, photovoltaic power, P2H, FC, gas turbine and electric boiler is built. Taking the minimum daily operation cost of microgrid as the objective function, and considering the output constraint of each device, the effects of P2H and FC on dispatch in both off-grid operation mode and grid-connected operation mode are analyzed respectively. CPLEX solver is used to solve the model, and the results of an example show that the proposed dispatch model is reasonable.

**Key words:** power to hydrogen; fuel cells; electricity-heat microgrid; day-ahead dispatch; coordination dispatch

## 附录 A

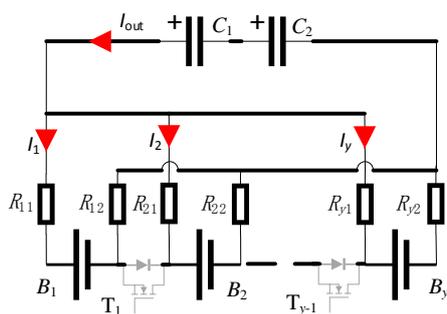


图 A1  $T_2-T_3$  阶段均衡器等效图

Fig.A1 Equivalent diagram of equalizer in  $T_2-T_3$  stage

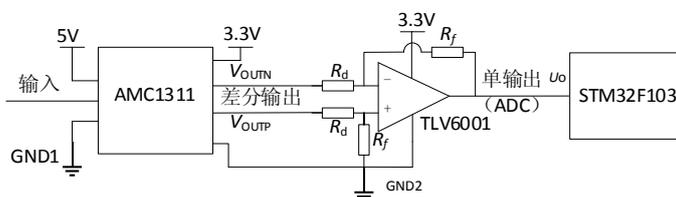


图 A2 电容电压采集原理图

Fig.A2 Schematic diagram of capacitor voltage acquisition

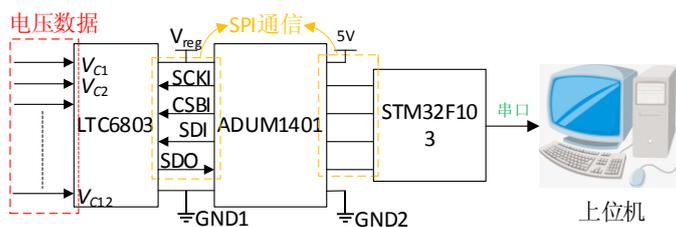


图 A3 单体蓄电池电压采样原理图

Fig.A3 Schematic diagram of single battery voltage sampling

## 附录 B

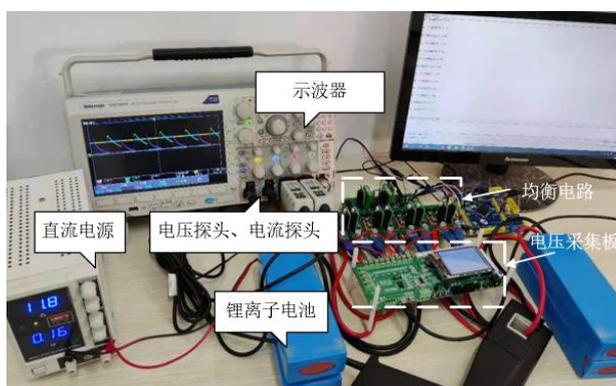


图 B1 实验平台

Fig.B1 Experimental platform

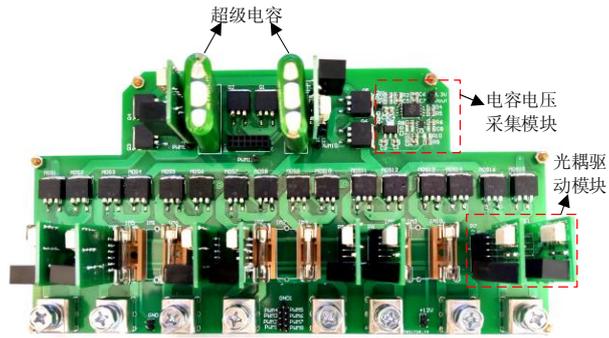


图 B2 均衡器样机

Fig.B2 Prototype of equalization circuit