

基于开关矩阵拓扑的蓄电池组均衡控制策略

李 川¹, 夏超英¹, 刘红锐²

(1. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072; 2. 昆明理工大学电力工程学院, 昆明 650000)

摘要:提出一种应用于直流不间断供电系统蓄电池组单体电池均衡的桥式开关矩阵拓扑, 利用 LC 均衡器进行能量的存储和转移, 实现了能量从电池组中荷电状态(SOC)最高的单体电池向最低的单体电池转移, 给出了参数设计方法, 在避免迂回均衡带来蓄电池充放电次数增多的同时, 延长了蓄电池的寿命, 提高了均衡和能量转移效率。在 Matlab-Simulink 环境下搭建了均衡系统模型并进行了仿真, 结果验证了所提出均衡策略的有效性和可行性。

关键词: 铅酸蓄电池; 桥式开关矩阵; 均衡效率

A Balanced Strategy for the Equalization of Storage Battery Based on Bridge Switch Topology

LI Chuan¹, XIA Chaoying¹, LIU Hongrui²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China)

Abstract: This paper proposes a bridge switch topology for the equalization of DC uninterruptible power system storage battery, using LC equalizer to transfer energy from the cell with the highest state of charge(SOC) to that with the lowest SOC in the battery pack. The parameter design is presented. Avoiding the increase of the charge and discharge times of the battery brought by the roundabout equalization, the proposed strategy extends the working life of the battery and improves the efficiency of equalization and energy transfer. The equalization system models of battery pack and balancing circuit are built and the results of the simulation experiment verify the availability and feasibility of the proposed balancing strategy.

Keywords: lead-acid storage battery; bridge switch matrix; balanced efficiency

单个铅酸蓄电池标称电压为 12 V, 因此在实际中需要通过大量的单体电池串联使用来满足不同的电压需求^[1-3]。而串联电池组中各单体电池之间荷电状态 SOC(state of charge)或端电压不一致的情况普遍存在, 因此采取有效的电池均衡具有极其重要的意义。

根据存储和传输能量元件的不同, 串联电池组均衡器主要分为: 电阻均衡器、电容均衡器、LC 振

荡电路均衡器、变压器均衡器和电感均衡器。其中电阻均衡器^[4]耗能、散热, 不能满足节能环保的要求; 电容均衡器^[5]依赖于单体电池间压差, 当单体电池间压差很小时, 无法有效均衡; 变压器均衡器^[6]会增加成本, 并且变压器本身损耗大, 能量转移效率低; LC 振荡电路均衡器^[7], 通过 LC 振荡提高电容电压, 能量以电压形式转移, 可控性差; 采用电感均衡器^[8-10], 能量以电流形式转移, 可控性强。

根据被均衡的单体电池和均衡能量流向的不同, 均衡策略可分为以下 5 种: ①对电池组中 SOC 最高的单体电池放电^[4], 能量以散热形式被电阻消耗掉; ②能量通过均衡器在相邻单体电池间转移^[10],

收稿日期: 2015-11-23

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA111203)

Project Supported by National High-tech R&D Program (863 Program)(2012AA111203)

这种均衡策略对不需要均衡的单体电池进行反复充放电;③能量通过均衡器从电池组中 SOC 最高的单体电池向最低的单体电池转移^[11];④对电池组中 SOC 最低的单体电池均衡充电^[8];⑤电池放电时,均衡能量通过变压器由电池组向组内端电压最低的单体电池转移;电池充电时,均衡能量由电池组中端电压最高的单体电池通过变压器向电池组转移^[12]。

文献[11]提出一种利用 LC 均衡器将能量从电池组中 SOC 最高的单体电池向最低的电池单体转移的均衡方案。均衡器通过双向晶闸管来限制电感的电流方向,用电感暂存来提高电容的能量转移能力。避免了其他几种均衡策略散热、耗能,迂回均衡,引入额外充电电源或变压器的缺点,提高了均衡效率。但由于均衡器中存在双向晶闸管,驱动复杂。

本文对文献[11]的方案进行了改进,能量以电感电流形式存储和传输,不需要双向晶闸管限制电感电流方向,不需要缓冲回路,并进一步简化了电路设计。通过控制桥式开关矩阵,实现能量从电池组中 SOC 最高的单体电池向最低的单体电池转移。最后在 Matlab 中的 Simulink 环境下搭建了电池组和均衡电路模型,并进行了仿真,验证了该拓扑的可行性与有效性。

1 均衡拓扑及其控制策略

1.1 桥式矩阵均衡拓扑

均衡电路拓扑结构如图 1 所示,其包括由 n 个电池单体组成的电池组,由 MOS 管和二极管组成的桥式开关矩阵以及由电感 L 、电容 C 和电阻 R 组

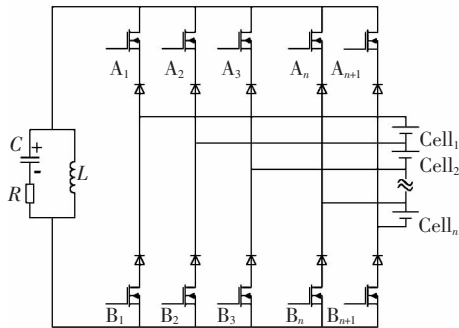


图 1 均衡电路拓扑

Fig.1 Topology of balancing module circuit

成的 LC 均衡器。由于 MOS 管中包含续流二极管,为防止电池短路,需要在 MOS 管上串联一个与续流二极管方向相反的二极管,均衡器通过电感 L 完成能量的存储和转移,电阻 R 和电容 C 在开关器件通断变换的死区时间内提供续流回路,电阻 R 用来抑制开关器件开通瞬间回路中的电流。

1.2 均衡策略

本文采用在电池组中 SOC 最高的单体电池向 SOC 最低的单体电池转移能量的均衡策略。假设电池组由 4 个电池单体组成,Cell₁ 的 SOC 最高,Cell₄ 的 SOC 最低,能量通过均衡器从 Cell₁ 向 Cell₄ 转移。在 1 个均衡周期中,根据电流回路可分为 2 个阶段,如图 2 所示。

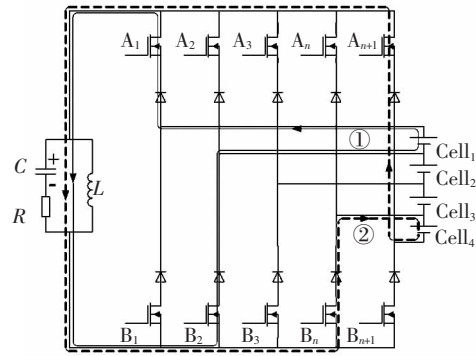


图 2 电流回路

Fig.2 Current loops

第 1 阶段:Cell₁ 向均衡器转移能量,开通 A₁ 和 B₂,其他开关关断,Cell₁ 同时给 L 、 C 充电,电流回路如图 2 回路①,电感电流逐渐增大,到达设定值时关断 A₁ 和 B₂,同时开通 A₃ 和 B₄,第 1 阶段结束。 L 两端电压: $U_L=L \frac{di_L}{dt}$,由此,则电感电流为

$$i_L = \frac{U_L t}{L} \tag{1}$$

式中: U_L 为电感 L 两端电压,约等于电池电压减去两个开关器件的导通压降; t 为每个周期中第 1 阶段时间, $t=\alpha T$,其中 T 为均衡周期, α 为控制 A₁、B₂ 的 PWM 占空比。第 1 阶段 Cell₁ 放出的能量为

$$W_R = W_L + W_C + W_{loss1} \tag{2}$$

式中: W_L 为电感储存的能量; W_C 为电容储存的能量; W_{loss1} 为第 1 阶段损耗的能量。 W_L 表示为

$$W_L = \frac{Li_L^2}{2} = \frac{\alpha^2 T^2 U_L^2}{2L} \quad (3)$$

当电容 C 取值很小时, $W_C \ll W_L$, W_C 可以忽略, 则式(2)可以表示为

$$W_R = W_L + W_{\text{loss}1} \quad (4)$$

第 2 阶段: 均衡器给 Cell₄ 充电, 开通 A₅ 和 B₄, 其他开关关断, 电流回路如图 2 回路②, 当电感 L 的电流减小到 0 时, 延时关断 A₅ 和 B₄, 第 2 阶段结束, 完成一个均衡周期。第 2 阶段 Cell₄ 吸收的能量为

$$W_A = W_L + W_{\text{loss}2} \quad (5)$$

式中, $W_{\text{loss}2}$ 为第 2 阶段的能量损耗。

1 个均衡周期的开关时序如图 3 所示。为防止电池短路, 需要给开关器件设置死区时间, 在死区时间内电容 C 与电阻 R 提供续流回路。

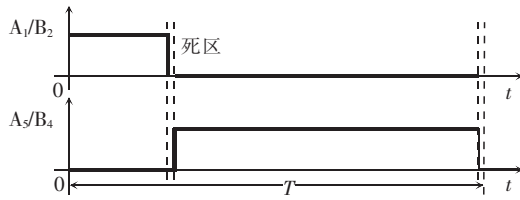


图 3 开关器件时序

Fig.3 Timing sequence of switching drive

2 两单体间的均衡仿真

2.1 参数选择

在 Matlab 中的 Simulink 环境中进行仿真, 验证本文方法的有效性。选取的铅酸蓄电池标称电压为 12 V, 额定容量 30 Ah; 选用的 MOS 管沟道电阻为 20 mΩ; 选用的二极管导通电压为 0.5 V。设 Cell₁ 初始电量最高, SOC 为 80%, Cell₄ 初始电量最低, SOC 为 78%。

均衡周期 T 取 20 ms, 死区时间取 1 μs, 在 LC 振荡回路中, RLC 组成一个典型二阶系统, 由基尔霍夫电压定律得: $Ri = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = 0$, 经过拉氏变换得

$$s^2 + \frac{Rs}{L} + \frac{1}{LC} = 0 \quad (6)$$

对于该二阶系统的阻尼比 $\zeta = \frac{R\sqrt{RC}}{2L}$ 和自然频率

$\omega_n = \sqrt{1/LC}$, 参数配置要综合考虑稳定性和快速性, 为保证该二阶系统的超调量低于 5%, 本文选择阻尼比 $\zeta = \frac{R\sqrt{LC}}{2L} = 0.707$, 为保证快速性, 本文 LC

振荡周期选择 $T_o = \frac{2\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n} = 0.002$ s, 则有

$$\begin{cases} LC < 0.000\ 000\ 025 \\ \frac{R\sqrt{LC}}{2L} = 0.707 \end{cases} \quad (7)$$

如式(1)所述 $i_L = \frac{U_L t}{L} = \frac{U_L \alpha T}{L}$, 当 α 、 U_L 固定时,

均衡电流与均衡周期 T 成正比, 与电感 L 成反比, 若均衡电流限定在 0.2 C 即 6 A, 对于本文所选用的 30 Ah 的电池单体, 均衡电流不超过 0.2 C, 本文设占空比 $\alpha = 30\%$, 参考式(1)取 $L = 15$ mH, $T = 20$ ms, 再根据式(7)配置电容 C 和电阻 R 的值, 这里取 $C = 1.5$ μF, $R = 140$ Ω。

2.2 仿真结果分析

在静置状态下采用图 1 所示的电路进行仿真, 实验结果如图 4 所示。电感电流波形如图 4(a)所示, 电容电压波形如图 4(b)所示。分析图 4 可知, 0~6 ms 是第 1 阶段, Cell₁ 同时对 L 和 C 充电, 电感电流持续升高, 电容电压接近稳定; 6~20 ms 是第 2 阶段, 从第 6 ms 时刻起, L 和 C 同时对 Cell₄ 放电, 电感电流持续下降, 电容电压变负。在 10.7 ms 时刻, 电感电流逐渐下降到 0, 结束均衡器对 Cell₄ 的放电, 电容的剩余能量在振荡回路中消耗掉。

均衡能量转移效率是用来衡量均衡过程中能量转移多少的物理量, 其表达式为

$$\eta = \frac{Q_A}{Q_R} \times 100\% \quad (8)$$

上述仿真的均衡能量转移效率即为单体电池 Cell₄ 吸收能量占单体电池 Cell₁ 放出能量的百分比。

在 Matlab 中的 Simulink 仿真环境中, 通过示波器可以直接观测到电池包实时的 SOC 值, 在均衡实验中, 两单体电池的 SOC 变化曲线如图 4(c)所示, 经过 1 866 s 两单体电池的 SOC 达到一致。两单体电池的 SOC 值均达到 78.89%, 电池 Cell₁ 放出的容量为 $Q_R = 30 \times 1.11\% = 0.333$ Ah, 电池 Cell₄ 吸

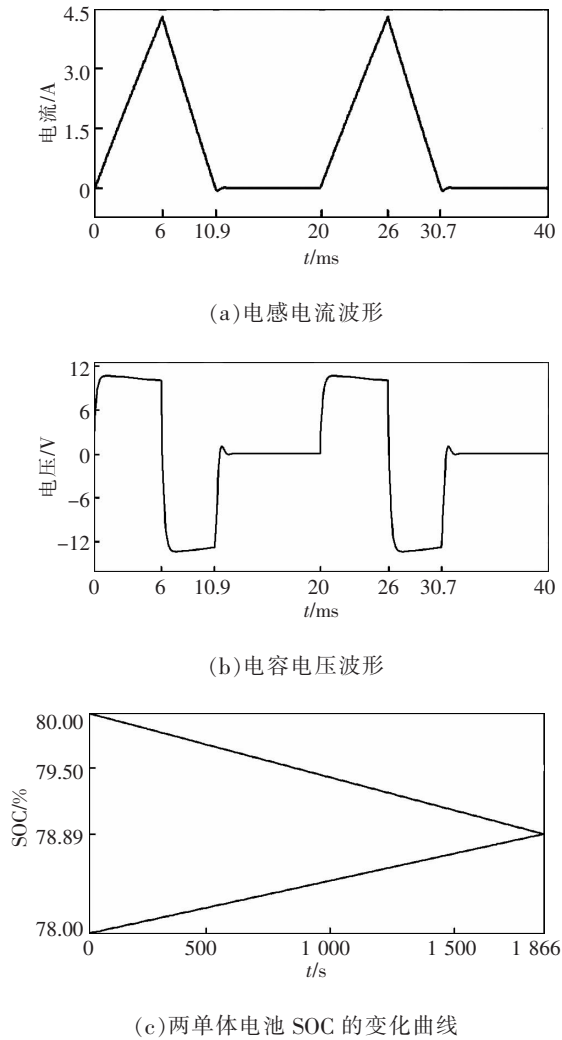


图4 均衡电路的仿真结果

Fig4. The simulation results of balance circuit

收的容量为 $Q_A=30 \times 0.89\% = 0.267$ Ah, 由式(8)计算均衡能量转移效率为 80.18%。

2.3 占空比取值分析

本文提出的均衡策略可以在充放电过程中对电池组进行均衡,在确定工况下,电池组充放电时间相对稳定,因此实际使用中,需要根据初始时刻电池单体间电量差和充放电时间估算出充放电均衡中需要的 α 取值。

根据图 1 所示的电路拓扑, U_L 约等于电容 C 两端电压,由图 4(b)估算出在每个均衡周期第 1 阶段 U_L^2 数值约为 121, 通过式(3)可计算出 $W_L = 0.144$ J。 $Q_R = 0.333$ Ah, $Q_A = 0.267$ Ah, 均衡时间为 1 866 s, 可计算出平均 1 个均衡周期内转移的能量

为 $W_R = 0.154$ J, $Q_A = 0.123$ J, 由此可得

$$W_L = 0.93W_R \quad (9)$$

假设均衡前两电池间能量差为 ΔQ , 均衡时间为 t_B , 共有 t_B/T 个均衡周期, 为使在 t_B 内 ΔQ 下降至 0, 则平均每个均衡周期中, Cell₁ 放出的能量与 Cell₄ 吸收的能量之和为 $W_A + W_R = \frac{\Delta Q}{t_B/T}$, 能量转移效率见上文仿真结果 80.12%, 这里按 80% 计算, 每个均衡周期都有 $W_R = 0.56 \times \frac{\Delta Q}{t_B/T}$, 则式(9)可以表示为

$$W_L = \frac{0.515 \times \Delta Q}{t_B/T} \quad (10)$$

根据式(3)和式(10)可求出 α 为

$$\alpha = \sqrt{\frac{1.03L\Delta Q}{TU_L^2 t_B}} \approx \sqrt{\frac{L\Delta Q}{TU_L^2 t_B}} \quad (11)$$

由于在一个均衡周期内, Cell₁ 放电时间不能超过 50% 个均衡周期, 故 α 不能超过 50%。

3 电池组均衡仿真

3.1 参数选择

本文在 Matlab 中的 Simulink 环境中进行仿真验证均衡策略在工况中的可行性。选择 6 个串联的铅酸单体电池组成蓄电池组, 设定每个单体电池标称电压为 12 V, 额定容量为 30 Ah, MOS 管沟道电阻为 20 m Ω , 二极管导通电压为 0.5 V, 各个单体电池的初始 SOC 值分别为 $SOC_0 = \{50\%, 48\%, 46\%, 44\%, 42\%, 40\%\}$ 。根据式(7)选取电感 $L = 15$ mH, 电容 $C = 1.5$ μ F, 电阻 $R = 140$ Ω 。设定均衡周期为 20 ms, 死区时间为 1 μ s。

3.2 充放电电流选择

图 5 所示为放电电流采用复杂工况放电电流, 充电电流为 10 A 恒流。仿真采用断续充电的方式, 假设一个均衡循环周期为 20 000 s, 0~10 000 s 为充电阶段, 对蓄电池同时进行充放电; 10 000~20 000 s 为放电阶段, 只进行放电。本仿真共完成 2 个循环周期, 实验结果分析如下。

3.3 第 1 个循环周期

充电阶段各单体电池的初始 SOC 为 SOC_0 ,

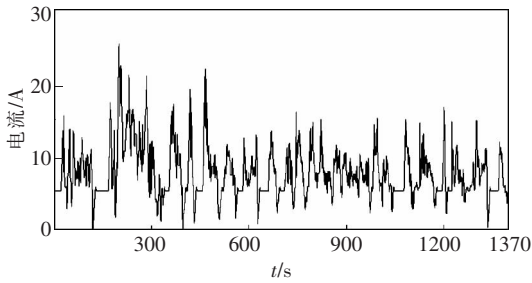
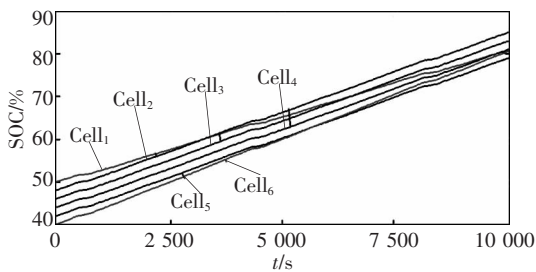


图 5 放电电流波形

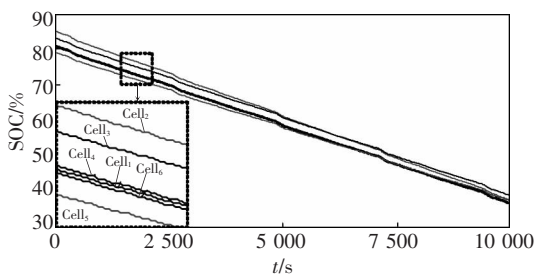
Fig.5 Discharging current waveform

Cell₁ 的 SOC 最高, Cell₆ 的 SOC 最低, 均衡电路要将 Cell₁ 的电量转移到 Cell₆ 中, 均衡时间 $t_B = 10\ 000\ s$, 参考式(11)占空比 α 取 28%。均衡过程中各单体电池的 SOC 变化曲线如图 6 所示。由图 6(a)可见, 充电阶段结束时各单体电池的 SOC 分别为 $SOC_1 = \{80.91\%, 85.07\%, 83.07\%, 81.07\%, 79.07\%, 80.66\%\}$; 由图 6(b)可见, 放电阶段各单体电池的初始 SOC 为 SOC_1 , Cell₂ 的 SOC 最高, Cell₅ 的 SOC 最低, 均衡电路要将 Cell₂ 的电量转移到 Cell₅ 中, 均衡时间 $t_B = 10\ 000\ s$, 参考式(11) α 占空比取 22%, 实验结束时各单体电池的 SOC 分别为 $SOC_2 = \{36.97\%, 37.85\%, 39.13\%, 37.13\%, 37.62\%, 36.71\%\}$ 。

分析图 6 可知, 在充电阶段参与均衡的两单体电池 Cell₁ 与 Cell₆ 初始 SOC 差值为 10%, 均衡后的



(a) 充电阶段各单体电池 SOC



(b) 放电阶段各单体电池 SOC 波形

图 6 第 1 次循环均衡各单体电池 SOC 波形

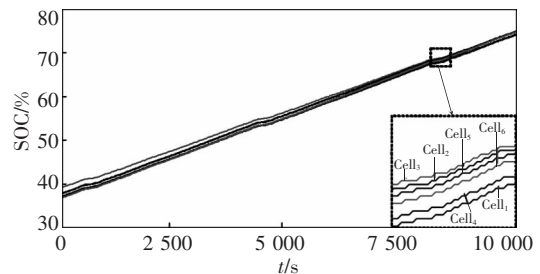
Fig.6 Curves of SOC in the first battery balancing

SOC 差值降低到 0.25%。在放电阶段, 参与均衡的两单体电池 Cell₂ 与 Cell₅ 初始 SOC 差值为 6%, 均衡后的 SOC 差值降低到 0.23%。

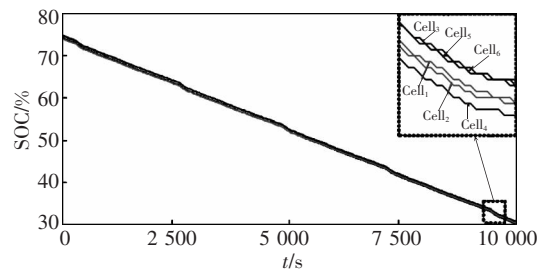
3.4 第 2 个循环周期

充电阶段各单体的初始 SOC 为 SOC_2 , Cell₃ 的 SOC 最高, Cell₆ 的 SOC 最低, 因此均衡电路要将 Cell₃ 的电量转移到 Cell₆ 中, 均衡时间 $t_B = 10\ 000\ s$, 参考式(11)取 α 为 14%。均衡过程中各单体电池的 SOC 变化曲线如图 7 所示。由图 7(a)可见, 实验结束时各单体电池的 SOC 分别为 $SOC_3 = \{74.00\%, 74.88\%, 74.76\%, 74.22\%, 74.75\%, 74.73\%\}$ 。放电阶段各单体的初始 SOC 为 SOC_3 , Cell₂ 的 SOC 最高, Cell₁ 的 SOC 最低, 因此均衡电路要将 Cell₂ 的电量转移到 Cell₁ 中, 均衡时间 $t_B = 10\ 000\ s$, 参考式(11) α 取 8%。由图 7(b)可见, 实验结束时各单体电池的 SOC 值为 $SOC_4 = \{30.50\%, 30.52\%, 30.83\%, 30.30\%, 30.82\%, 30.82\%\}$ 。

分析图 7 可知, 在充电阶段参与均衡的两单体电池 Cell₃ 与 Cell₆ 初始 SOC 差值为 2.42%, 均衡后的 SOC 差值降低到 0.03%。在放电阶段参与均衡的两单体电池 Cell₂ 与 Cell₁ 初始 SOC 差值为 0.88%, 均衡后的 SOC 差值降低到 0.02%。



(a) 充电阶段各单体电池 SOC



(b) 放电阶段各单体电池 SOC

图 7 第 2 次循环均衡各单体电池 SOC 波形

Fig.7 Curves of SOC in the second battery balancing

3.5 仿真结果分析

本仿真完成了2个均衡循环周期,包括4个均衡阶段,各单体电池的初始SOC、每个实验结束后各单体电池的SOC、均衡时间、参与均衡单体电池及其均衡前后SOC差值如表1所示。

通过SOC₀可以看出,初始各单体电池SOC的最大差异为10%,经过2个均衡循环均衡实验后各单体电池SOC的最大差值降低为0.53%,基本一致。由此可见电池组的均衡效果显著。

表1 各均衡实验的SOC值及均衡时间

Tab.1 SOC values and balancing time at the balancing experiments

均衡阶段	均衡时间/s	参与均衡的单体电池	SOC差/%	
			均衡前	均衡后
第1次 充电均衡	10 000	Cell ₁ 、Cell ₆	10	0.25
第1次 放电均衡	10 000	Cell ₂ 、Cell ₅	6	0.23
第2次 充电均衡	10 000	Cell ₃ 、Cell ₆	2.4	0.03
第2次 放电均衡	10 000	Cell ₂ 、Cell ₁	0.88	0.02

4 结论

本文提出了一种用于直流不间断供电系统蓄电池组的均衡方法,给出了桥式开关矩阵的电路拓扑和均衡策略,并对其进行了损耗分析,最后进行了仿真,实验结果表明本文提出的均衡策略有以下优点:

(1) 引入电容和电感,实现了能量以电流形式进行转移,克服了电容作为均衡器时能量转移能力受单体电池间电压差的限制,提高了均衡效率。

(2) 通过控制桥式开关矩阵,实现了能量由电池组中端电压或SOC最高的单体电池向最低的单体电池直接转移,克服了迂回的均衡控制策略对不需要均衡的单体电池进行反复充放电的缺点,提高了均衡效率和电池使用寿命。

参考文献:

- [1] Hsieh Y C, Wu J L, Chen X H. Class-E-based charge-equalization circuit for battery cells[J]. IET Power Electronics, 2012, 5(7): 978-983.
- [2] Cheng K W E, Divakar B P, Wu Hongjie, et al. Battery-Management system(BMS)and SOC development for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(1): 76-88.
- [3] Wang Leyi, Polis M P, Yin G G, et al. Battery cell identification and SOC estimation using string terminal voltage measurements[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(7): 2925-2935.
- [4] Cao Jian, Schofield N, Emadi A. Battery balancing methods: a comprehensive review[C]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008: 1-6.
- [5] Baughman A, Ferdowsi M. Analysis of the double-tiered three-battery switched capacitor battery balancing system [J]. 2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006: 1-6.
- [6] Shin J W, Seo G S, Chun C Y. Selective flyback balancing circuit with improved balancing speed for series connected lithium-ion batteries[C]. The 2010 International Power Electronics Conference. Sapporo, Japan, 2010:1180-1184.
- [7] Imtiaz A M, Khan F H. Time shared flyback converter based regenerative cell balancing technique for series connected Li-Ion battery strings[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2013, 28, (12): 5960-5975.
- [8] Liu Hongrui, Xia Chaoying. An active equalizer for serially connected lithium-ion battery cells[C]. 2nd International Conference on Energy and Environmental Protection, 2013: 809-812.
- [9] 刘红锐, 夏超英, 黄日俊, 等. 一种基于LC振荡电路的串联蓄电池均衡器[J]. 电源技术, 2015, 39, (1):110-112.
Liu Hongrui, Xia Chaoying, Huang Rijun, et al. Equalizer for serially connected battery cells based on LC oscillation circuit[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39, (1): 110-112(in Chinese).
- [10] Wang Liye, Wang Lifang, Liao Chenglin. Based on energy transferring for battery packs applied on electrical vehicle [C]. 2010 International Conference and Communication

Technologies in Agriculture Engineering, 2010: 271-274.

- [11]刘红锐, 夏超英. 一种新型的电动汽车用电池均衡方法探讨[J]. 汽车工程, 2013, 35(10): 934-938.

Liu Hongrui, Xia Chaoying. An investigation into a new battery balancing solution for electric vehicles[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(10): 934-938(in Chinese).

- [12]Einhorn M, Roessler W, Fleig J. Improved performance of serially connected Li-Ionbatteries with active cell balancing in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(6): 2448-2457.

- [13]邱斌斌, 王智弘, 李程, 等. 电池组用荷电状态均衡充电模糊控制策略[J]. 电源学报, 2015, 13(2): 113-120.

Qiu Binbin, Wang Zhihong, Li Cheng, et al. Reviewer of estimating the state of battery charge for electric vehicle[J].

Journal of Power Supply, 2015, 13(2): 113-120(in Chinese).



李川

作者简介:

李川(1990-),男,硕士研究生,研究方向: 电力电子与电力传动,E-mail:lichuan0410@126.com。

夏超英(1958-),男,通信作者,硕士,教授,研究方向:控制理论与应用、自适应控制系统、电力电子技术及装置、电动汽车、混合动力汽车,E-mail:xiachaoying@126.com。

刘红锐(1982-),女,博士,副教授,研究方向: 电力电子与电力传动,E-mail:liuhongr888@163.com。

(上接第 83 页)

酸锂电池内阻研究[J]. 电源学报, 2017, 15(2):153-158.

Liang Qi, Yu Chunmei, Wang Shunli, et al. Research on internal resistance of aviation battery based on PNGV circuit model[J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(2):153-158(in Chinese).

- [11]Charkhgard M, Farrokhi M. State-of-charge estimation for lithium-ion batteries using neural networks and EKF [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(12): 4178-4187.

- [12]Deng Julong. Control problems of grey systems[J]. Systems & Control Letters, 1982, 1(5): 288-294.

- [13]Luo R C, Chen T M. Autonomous mobile target tracking system based on grey-fuzzy control algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(4): 920-931.

- [14]Wai R J, Tu C H. Adaptive grey control for hybrid resonant

driving linear piezoelectric ceramic motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(2): 640-656.



王枫

作者简介:

王枫(1992-),男,硕士研究生,研究方向: 充电机设计及充电方法,E-mail:fengwangsd@hotmail.com。

史永超(1989-),男,硕士,研究方向: 充电机设计及充电方法,E-mail:chinashiyc@sina.com。

崔纳新(1968-),女,通信作者,博士,教授,研究方向:变频节能、电动汽车、电池管理系统,E-mail:cuinx@sdu.edu.cn。

李超群(1991-),男,硕士研究生,研究方向:电动汽车无线充电技术研究,E-mail:dgdaqun@sina.com。