

# 串联蓄电池均衡充电系统

孙频东

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

**[摘要]** 用电感、二极管和开关器件构成串联蓄电池充电的均衡电路,使蓄电池在串联的情况下,实现均衡充电. 分析了均衡器的工作原理,指出该均衡器具有动态分配过充电能的特点. 利用蓄电池的充电电压和充电状态之间的关系,用蓄电池的状态估计法和倒推法,解决了均衡器中开关器件的 PWM 脉冲占空比的计算问题. 整个串联蓄电池充电系统具有结构简单、灵活和可扩展的优点.

**[关键词]** 蓄电池, 充电器, 均衡电路, 单片机

**[中图分类号]** TM912 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2006)01-0012-05

## Charging System for Series Connected Battery

SUN Pindong

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** The proposed charge equalizing circuit (CEC), which consists of inductor, diode and switching device, performs an equally-charging characteristic for seriesly connected batteries. The operational principle of CEC, which can redistribute excess charging energy, has been analyzed in the paper. Taking advantage of the relationship between the state of charges and the voltage of batteries, the duty ratio of switching device in the CEC can be calculated by using measured voltage of battery. The whole system of CEC achieves simple structure, flexibility and extendibility.

**Key words:** battery, charging device, equalizer, micro controller

### 0 引言

在对串联连接的蓄电池组进行充电时,由于电池组中各基本单元的电化学特性存在差异,当一些单元电池被充满电时,而另一些单元电池尚需继续充电,这使得被充满电的单元发生过充电现象. 过充电,对蓄电池产生非常不利的影响. 相反,那些长期充电不足的蓄电池,会使蓄电池容量下降,内阻增加,造成蓄电池的早期损坏. 因此,如何防止蓄电池在充电过程中出现过充和充电不足现象,引起了国内外学者的广泛关注,提出了许多解决上述问题的方法,如在单元电池旁并联均衡器,为充电电流提供一条分流的路径,使未完成充电的蓄电池得以继续充电,已完成充电的蓄电池不再被继续充电. 由于使用的均衡器各有不同,使得充电系统在性能上各有特点,在单元电池旁并联电感和开关器件既可以分流又能节能.

### 1 蓄电池组充电器的的工作原理及控制策略

蓄电池组均衡充电是通过外接均衡器实现的,对均衡器的工作原理作如下分析.

#### 1.1 均衡器的工作原理

均衡电路对被充电蓄电池的作用主要在充电的后期,常用的均衡电路如图 1、图 2 所示. 图 1 所示的均衡器具有控制简便的特点,但均衡器工作时要消耗部分电能. 图 2 所示的均衡器能通过电感储能,将过充的能量回送到电源,具有节能的特点. 均衡器的工作原理如下:当第  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 个单元电池充电到规定电压后,均衡器开始工作,充电系统控制器对开关器件  $S_i$  的门极加周期性触发脉冲  $U_{gi}$ . 设  $U_{gi} = 0$ , 开

收稿日期: 2005-04-20.  
作者简介: 孙频东 (1957-), 副教授, 主要从事电力电子方面的教学与研究. E-mail: sunpindg@sina.com  
— 12 —

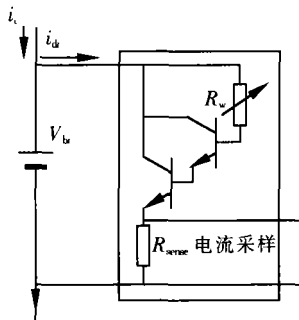


图1 均衡器原理图

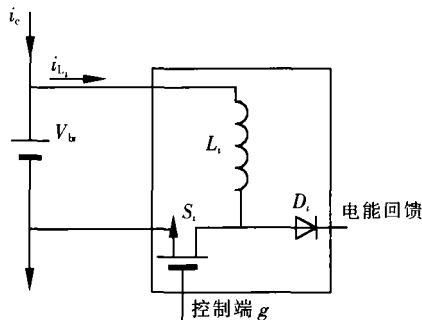


图2 推荐使用均衡器原理图

关  $S_i$  断开;  $U_{gi} = 1$ , 开关  $S_i$  接通. 当  $S_i$  接通时, 电感  $L_i$  储能, 电感电流  $i_{Li}$  线性增长如 (1) 式及图 3 所示:

$$\dot{i}_{Li}(t) = \dot{i}_{Li}(t_0) + \frac{V_{bi}}{L_i} t \quad (t_1 \leq t < t_2) \quad (1)$$

式中,  $V_{bi}$  为第  $i$  个充足电后蓄电池的电压值. 当  $S_i$  断开时, 电感电流  $i_{Li}$  通过二极管  $D_i$  将电能回送电源, 这时, 电感电流线性下降, 如 (2) 式及图 3 所示:

$$\dot{i}_{Li}(t) = \dot{i}_{Li}(t_1) - (t - t_1) \cdot \sum_{j=1}^n V_j \quad (t_2 \leq t < t_3) \quad (2)$$

式中,  $n = i - 1, i = 1$  当  $i = 1$  时, 用 (3) 式:

$$\dot{i}_{Li}(t) = \dot{i}_{Li}(t_1) - (t - t_1) \cdot \sum_{j=2}^m V_j \quad (t_3 \leq t < t_4) \quad (3)$$

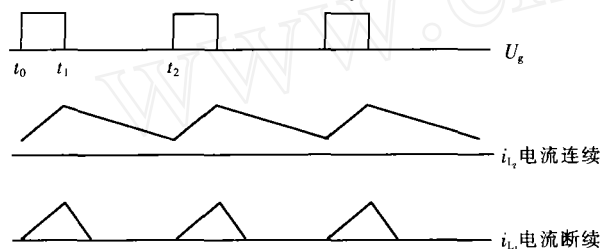


图3 电流  $i_{Li}$  的波形图

式中,  $m$  为串联蓄电池的个数,  $V_j$  为第  $j$  个蓄电池的端电压. 设靠近充电电源正极的蓄电池编号为 1, 靠近接地端的蓄电池编号为  $m$ , 见图 5 均衡器 2 ~  $m$  具有相同的电路结构, 如图 2 所示. 由于电路结构的原因, 均衡器 1 的内部构成和其它均衡器略有不同, 如图 4 所示. 另外, 根据外电路的具体情况, 靠近接地端的蓄电池, 放电时电流变化较快, 容易形成电流的不连续. 如果需要电流连续, 可通过对开关  $S_i$  的控制脉冲  $U_g$  的占空比的调节实现. 即, 为使电感电流  $i_{Li}$  连续, 当各均衡器中电感取值相同时, 对编号大的均衡器需较大的占空比. 通常情况下, 均衡器中的电感电流  $i_{Li}$  为不连续. 图 5 为加入均衡器后的充电电路. 图 6 为均衡器内部结构图, 控制器输出脉冲和均衡器中 IGBT 之间有一个驱动电路. 图 7 所示为充电过程中的能量回送等效电路. 当蓄电池  $B_n$  充满电时, 和其并联的 IGBT 在控制电路的作用下间隙导通. 导通时, 等效电路如图 7 (a) 所示, 电感  $L_n$  蓄电; IGBT 截止时, 电感通过图 7 中 (b) 所示回路放电, 电能回送其它蓄电池.

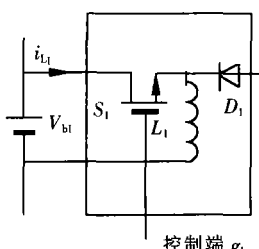


图4 推荐的均衡器原理图

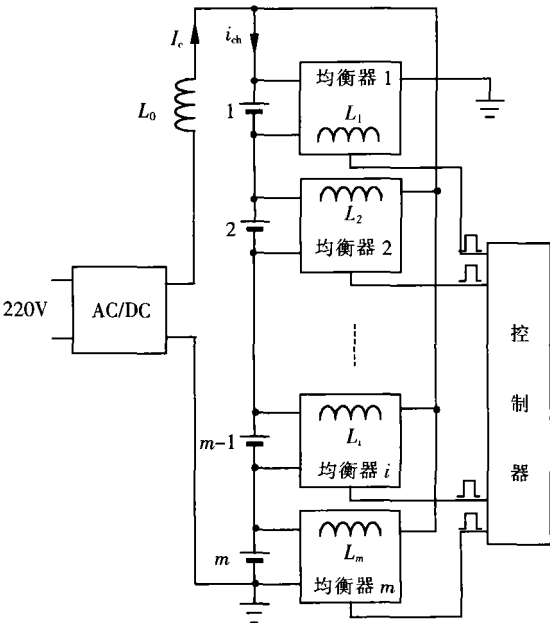


图5 串联充电系统结构框图

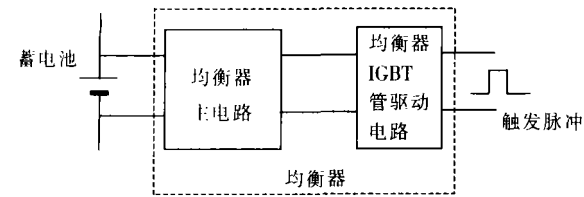


图 6 均衡器内部结构图

1.2 充电系统的控制策略

1.2.1 蓄电池的充电状态估计

蓄电池充电过程中需要了解充电进行到何种状态. 通常, 对蓄电池的充电状态有多种测定方法, 如电解液的浓度测定和蓄电池的充电电压测定等. 充电电压测定法用于测定蓄电池的充电状态 (SOC), 在基于微机的控制系统中, 比较方便. 即通过对蓄电池充电电压的测定了解蓄电池的充电情况. 但不同类型的蓄电池有不同的关系曲线, 对本文涉及的蓄电池, 其充电电压和充电状态有如表 1 所示的关系.

表 1 充电电压和充电状态之间的关系

充电电压 /V	11	11.5	12	12.2	12.5	12.7	12.8	12.9	13	13.1	13.2
充电状态 (SOC)	0.28	0.43	0.73	0.8	0.9	0.93	0.94	0.95	0.96	0.95	0.92

1.2.2 蓄电池端电压测量

蓄电池端电压的测量, 通常用 A/D 转换实现. 值得注意的是, 端电压在充电和放电过程中是不同的, 同样是放电, 端电压随放电电流的大小会发生变化, 因此, 在电压测量时要维持一个相对稳定的状态. 在进行电压测量时, 除关闭所有的均衡电路外, 还要有一个 30 ~ 60 s 的调整时间, 使蓄电池进入相对平稳阶段, 然后再对其进行测量. 测量的程序流程如图 8 所示.

1.2.3 能量回送算法

当蓄电池组中, 第  $i$  个蓄电池充足电, 其它蓄电池仍需要继续充电时, 这时启动第  $i$  个蓄电池的均衡器. 考虑到均衡器工作后, 充入蓄电池的电能量, 应近似等于蓄电池输送到均衡器的能量. 蓄电池释放的能量可通过对均衡器中开关器件占空比  $D_i$  的调节实现, 下标  $i$  表示第  $i$  个的均衡器, 均衡器将一个周期内 (即  $T_s$  时间内) 多充的电量, 在  $DT_s$  时间内送到均衡器. 在一个周期内流入均衡器  $i$  的平均电流如 (4) 式所示:

$$I_d = \frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} \frac{V_B}{L} t dt = \frac{V_B T_s D_i^2}{2L} \tag{4}$$

在一个周期内, 流入蓄电池的电流为:

$$I_{bi} = I_c + \sum_{j=i+1}^m I_{fj} \tag{5}$$

式中,  $I_c$  为正常的充电电流,  $I_{fj}$  第  $j$  个均衡器的能量回送电流平均值, 如 (6) 式所示:

$$I_{fj} = \frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} \frac{V_B (j-1)}{L} t dt = \frac{V_B T_s D_j^2}{2L (j-1)} \tag{6}$$

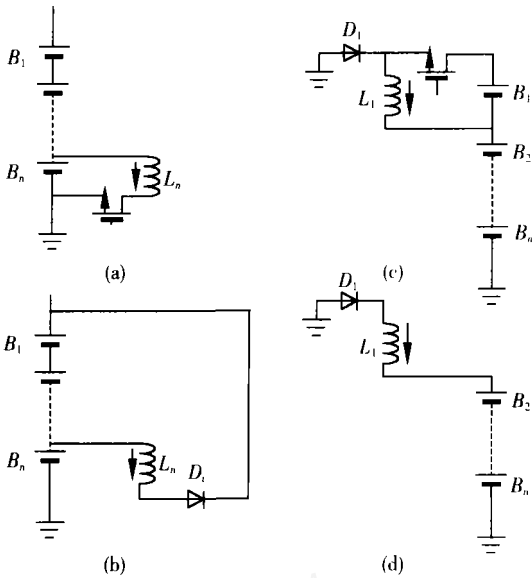


图 7 电能回馈等效通道

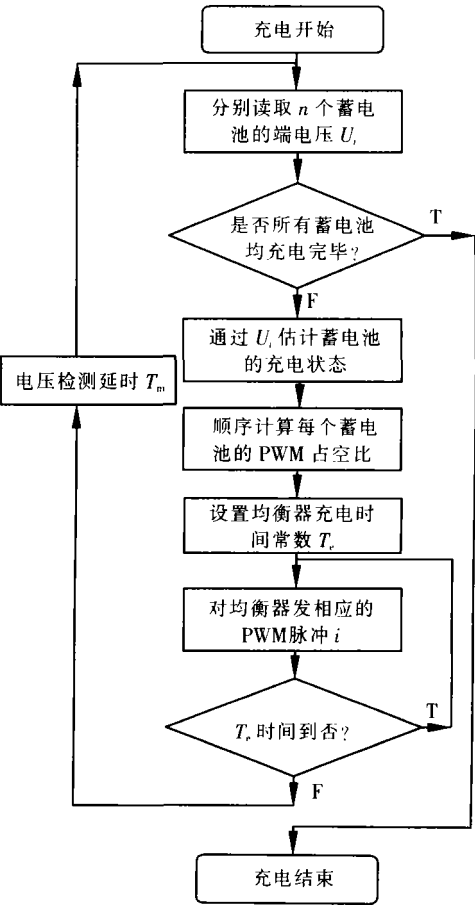


图 8 串联充电系统工作流程图

只有当第  $j$  个均衡器工作时才有电流. 为了分析、计算的方便, 这里采用倒推法求出各开关器件的占空比. 方法如下:

假设最后一个蓄电池已完成充电, 需要计算放电的占空比. 从式 (4)、(5) 可得 (7) 式:

$$D_i = \frac{\sqrt{\frac{2L}{N_B T_s} \left( I_c + \sum_{j=i+1}^m I_f \right)}}{\sqrt{N_B T_s}} \tag{7}$$

考虑到能对最后一个蓄电池进行能量回送的只有 1 号蓄电池, 而且它的能量要回送给除 1 号以外的所有蓄电池, 因此每一个蓄电池得到的能量最少, 为了分析问题的方便也不至于产生大的误差, 在计算最后一个蓄电池均衡器占空比时, 忽略 1 号蓄电池可能回送的部分能量, 即用 (8) 式进行估算:

$$D_m = \frac{\sqrt{\frac{2L}{N_B T_s} I_c}}{\sqrt{N_B T_s}} \tag{8}$$

倒数第二个均衡器的占空比可用 (9) 式计算. 其余的均衡器占空比计算照此类推如 (10) 式所示. 需要说明的是, 不工作的均衡器其占空比为 0:

$$D_{m-1} = \frac{\sqrt{\frac{2L}{N_B T_s} I_c + \frac{D_m^2}{m-1}}}{\sqrt{N_B T_s}} \tag{9}$$

$$D_k = \frac{\sqrt{\frac{2L}{N_B T_s} I_c + \sum_{i=k+1}^m \frac{D_i^2}{i-1}}}{\sqrt{N_B T_s}} \tag{10}$$

如果考虑电压检测阶段即在  $T_m$  内, 充电照常进行, 放电均衡器停止工作的特点, 在此段时间内充入的电荷应在均衡器工作阶段内均匀释放, 因此还需对 (10) 式中的  $I_c$  进行修正, 修正后如式 (11) 所示:

$$D_k = \frac{\sqrt{\frac{2L}{N_B T_s} I_c (1 + T_m) + \sum_{i=k+1}^m \frac{D_i^2}{i-1}}}{\sqrt{N_B T_s}} \tag{11}$$

2 实验结果

实验蓄电池系统的电气参数如下所示:

- (1) 5 个蓄电池串联充电; 单元电池的容量为 40 Ah; 额定电压 12 V; 充电电流 4 A.
- (2) 均衡器电感  $L = 0.5 \text{ mH}$ ; PWM 脉冲周期  $T_s = 0.1 \text{ ms}$ ; 充电周期  $T_c = 5 \text{ min}$ ; 电压检测延时  $T_m = 0.5 \text{ min}$

当均衡器 5 工作、其余均衡器不工作时, 蓄电池组的充电电流  $i_{ch}$  波形 (测量点在 1 号蓄电池处)、充电电源电流  $I_c$ 、5 号均衡器中的电感电流和回馈电流的波形如图 9 所示.

当均衡器 1、2 工作, 其余均衡器不工作时, 蓄电池组充电电流  $i_{ch}$  波形 (测量点在 5 号蓄电池处)、充电电源电流  $I_c$ 、及 1 号、2 号均衡器的回馈电流波形如图 10 所示.

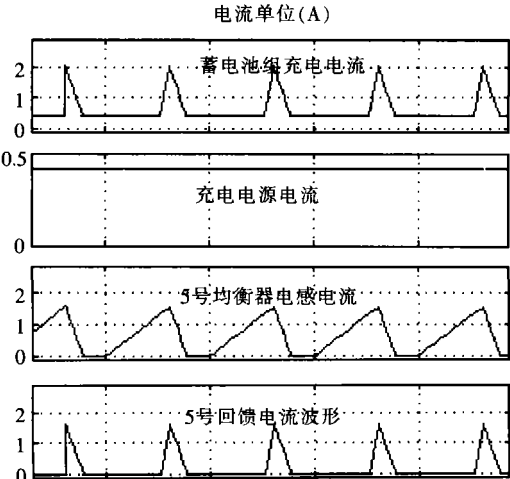


图 9 5 号均衡器工作时系统中电流波形

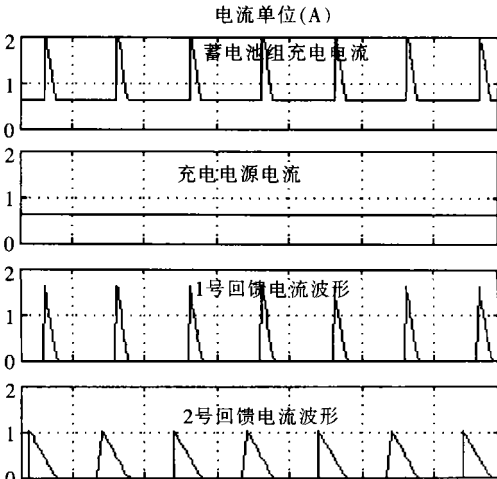


图 10 1 号、2 号均衡器工作时系统中的电流波形

3 结论

用电感加开关器件构成均衡器和用电阻加开关器件构成的均衡器相比,在不增加系统复杂性的基础上,具有节能的优点. 为适合微机控制,通过对蓄电池端电压的测量来估算蓄电池的充电状态,易于实际操作. 通过仿真和实验,证明本均衡系统具有结构简单、控制灵活、价格低廉、工作安全可靠等特点,易在工业界推广.

[参考文献] (References)

[1] CHATZAKIS J, KALAFITZAKIS K, VOULGARIS N C, et al Designing a new generalized battery management system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50 (5): 990~ 998

[2] KUTKUTN H, WIEGMAN H L N, DUMAN D M, et al Design consideration for charge equalization of an electric vehicle battery system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35 (1): 28~ 35.

[3] HUNG S T, HOPKINS D C, MOSLUNG C R. Extension of battery life via charge equalization control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1993, 40 (1): 96~ 104.

[责任编辑:严海琳]

(上接第 11 页)

[参考文献] (References)

[1] 石舒健, 王江江, 王慧, 等. 神经网络 PD 控制器在高精密空调系统中的应用 [J]. 仪器仪表用户, 2004, 11 (6): 65~ 67.

SHI Shujian, WANG Jiangjiang, WANG Hui, et al The application of neural network adaptive PD controller in high precision air-conditioning control [J]. Electronics Instrumentation Customer, 2004, 11 (6): 65~ 67. (in Chinese)

[2] 郭旭红, 芮延年, 李军涛. 基于遗传算法的模糊智能变频空调仿真系统的研究 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (5): 1237~ 1240.

GUO Xuhong, RUI Yannian, LI Juntao. Research on simulation system of fuzzy intelligence inverter air-conditioner based on genetic algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17 (5): 1237~ 1240. (in Chinese)

[3] 曹国庆, 姜承芝, 安大伟. 模糊 PD 自整定控制在空调系统中的应用研究 [J]. 暖通空调, 2004, 14 (10): 106~ 109.

CAO Guoqing, LOU Chengzhi, AN Dawei. Application of fuzzy self-tuning PD control to air conditioning system [J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 2004, 14 (10): 106~ 109. (in Chinese)

[4] 余永权, 曾碧. 单片机模糊逻辑控制 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995: 98~ 198.

YU Yongquan, ZENG Bi. Microcontroller Fuzzy Logic Control [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1995: 98~ 198. (in Chinese)

[责任编辑:刘 健]