

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2016.04.023

面向电动汽车充电站的智能主动型均衡控制研究^①

张 里¹, 张 劼²

1. 重庆理工大学 电子信息与自动化学院, 重庆 400054, 2. 重庆理工大学 经济与贸易学院, 重庆 400054

摘要: 针对电动汽车充电站的管理和控制需求, 设计了一种智能型主动均衡系统. 系统采用分散与集中组合的拓扑结构, 释放和补充的均衡方式, 对不一致的单体电池能量进行均衡, 选择电感和电容储能的能量转移方式, 对释放的能量回馈, 并且应用模糊控制技术对均衡过程进行控制. 仿真研究结果表明, 系统可以实现动态充电模式和静态搁置模式下动力电池的均衡, 满足充电站的动力电池组的均衡控制要求.

关键词: 充电站; 动力电池; 主动均衡; 模糊控制

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2016)04-0150-08

发展电动汽车是提高汽车产业竞争力、保障能源安全和发展低碳经济的重要途径. 如何建设功能完善的充电站, 保障电动汽车的动力补充, 成为推动电动汽车走向实际应用的瓶颈问题^[1]. 目前, 电池充电速度的控制是电动汽车充电站存在的主要问题, 而电池充电仅依靠电动汽车本身的管理系统完成. 随着以电池租赁为代表的纯电动汽车商业模式创新取得进展, 电动汽车数量日益增长与充电站数量矛盾加剧, 电动车电池充电速度的均衡控制显得尤为重要^[2].

电动车动力供电通常采用数十个单体电池串联方式. 电池在制造时受到工艺、材质、环境温度、内阻、自放电率等条件限制, 使得电池个体的性能存在偏差. 随着使用时间增长, 电池间差异逐渐增大, 电池的实际容量不平衡加剧, 使某些单体电池长期处于过充过放状态, 严重影响蓄电池的使用寿命; 一旦一个或数个出现问题, 直接导致电动车的动力故障, 影响行车安全. 因此, 电池均衡控制成为不可缺少的功能和关键技术.

本文分析了均衡控制系统的结构和技术, 针对电动汽车动力电池充电站管理系统的需求, 设计了一种智能型的主动均衡系统. 该系统采用分散与集中组合的拓扑结构, 电感和电容储能作为能量转移方式, 并用模糊控制技术对均衡过程实施控制. 在建立电池模型的基础上, 进行模拟实验, 结果表明系统实现了动力电池组的均衡控制, 可满足电动汽车动力电池充电站管理系统的需求.

1 电动汽车充电站均衡系统的结构和方式设计

电动汽车充电站均衡系统与车装载的使用环境有较大的区别, 需要考虑充电站的整体电能管理系统框架条件. 充电站应当具备两级管理和控制结构(图 1、图 2), 由上位机的中央控制模块通过 CAN 总线, 分别控制若干本地模块, 每个本地模块负责一个电池组(多个电池)的控制与管理. 本地模块通过下位机的微处

① 收稿日期: 2015-03-23

基金项目: 重庆市科学技术项目基金资助(KJ110817).

作者简介: 张 里(1979-), 男, 山西安泽人, 实验师, 主要从事电动汽车及电子技术研究.

理器控制电池组,完成对电池组的充电、均衡和数据采集以及容量计算、显示和通信等辅助功能^[3-4].

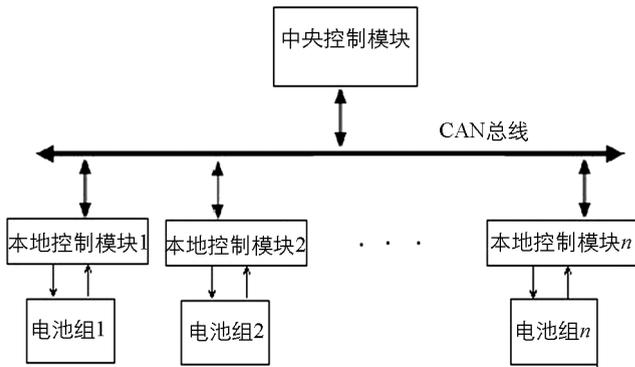


图 1 充电站两级控制的结构

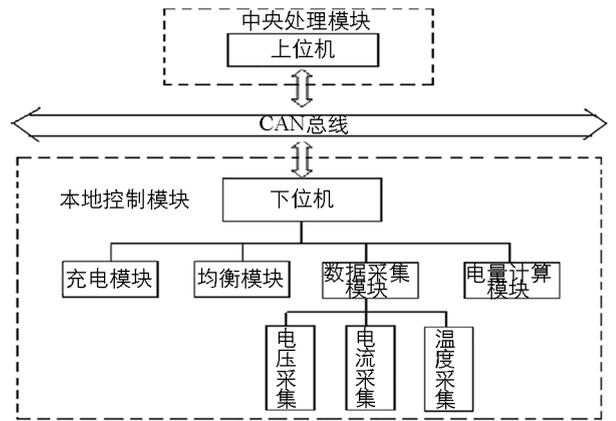


图 2 本地控制模块结构

1.1 电池管理的均衡设计

根据电池的使用功能以及均衡作用与充电模式的相关程度,均衡电路可分为被动均衡、主动均衡.因为被动均衡必须与充电过程一起完成均衡充电任务,不充电时均衡电路不发挥作用;在使用电池过程中长时间不充电,单体之间得不到均衡,荷电量差异就会越来越大.主动均衡完全不依赖充电模式,在充电、放电、搁置中的任一状态下都能发挥均衡作用,显然,主动均衡具有更好的效果.

1.2 能量平衡与传递

动力电池组单体电池进行平衡的方法很多,实现能量均衡的方式一是补充、二是释放;根据能量传递方式,分为能量消耗型和能量回馈型^[5-6].

能耗型采用功率电阻作为分流组件,当电池电压达到或超过限制电压时电阻分流,流过电池内部电流减小,维持限制电压.能耗型的优点是电路简单,成本低,发热低,但可靠性较差.电动汽车用电池组,容量和功率需求相当大,需用大倍率电流实现快速充电,因此,不能靠电阻分流实现均衡.

能量回馈型相对复杂,需要一个可控的储能装置(电容、电感、变压器或者其他储能装置),可以将能量从容量较高的单体转移到容量较低的单体,或将多余的能量重新转移到电池组中进行再分配,从而减小单体电池间的不一致性,实现电池组均衡充电,故称为能量转移或回馈型.对于电动汽车充电站,使用电池组能量回馈型的均衡是最佳的选择.

1.3 分散与集中的拓扑结构

从均衡电路的拓扑结构来分,常见的设计有集中均衡和分散均衡两种,关系到系统的复杂性、成本和效率.集中均衡是整个电池组共享一个均衡器,而分散均衡是多个电池对应多个均衡器.集中均衡的实现是利用外部电源或电池组本身能量,对能量不足的单体电池补充能量,使用同一个均衡充电器,寻找容量不足的单体电池,通过动力开关网络,每次只对一个电池均衡充电.这种结构方式,效率低,使用继电器或动力开关网络降低系统的可靠性.分散均衡使用多个分布的均衡器,自动化程度高,效率高,但成本高.

综合以上因素,系统采用分散与集中的结合方式,即分组—集中均衡的结构(如图1).集中结构是一个电池组使用一个均衡控制器,采用集中控制方式,可以适当地简化控制结构;分散结构是多组的控制,便于组合,可满足电动汽车不同的电压需求.储能组件选用电感电容,并利用本组的电池实现能量的组内能量均衡,电池静态和动态充电状态下进行均压控制,实现高效主动的均衡.

每组使用一个控制器,便于实现硬件网络化管理和控制.本地控制模块采用高性能微处理器(如嵌入式计算机或者DSP),分别对充电模块、均衡模块和数据采集模块以及其它辅助功能模块进行控制,各功能模块可以用性能价格比较高的单片机进行智能控制(图2).电站管理系统的高性能PC机或工作站,通过高速

总线对各个本地模块管理,实现系统的网络化、模块化管理,可满足充电站管理系统的上位机和本地控制器两级结构是一种理想的结构化、模块化的控制结构。

均衡模块在本地控制模块中完成一组电池的均衡(图3),包括一个控制器、PWM发生器和逻辑控制电路以及均衡主电路。该模块既能单独完成电池均衡,也能与主充电回路完成均衡。

2 均衡主电路与控制器设计

均衡主电路利用储能组件变压器、电容、电感和开关电路,实现能量的合理流动。系统均衡主电路采用单向DC开关电路,利用开关通断,改变电池、电容和电感的存储能量,实现电池组内电量的相互转移,完成电池组电压的均衡功能。该设计电池组选用3个单电池 B_1 、 B_2 、 B_3 组成。功率器件 T_1 、 T_2 、 T_3 , T_r ,二极管 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_r 组成DC开关电路,储能组件由过渡电容 C_r 、电感 L_1 、 L_2 、 L_3 和过渡电感 L_r 组成。单片机输出PWM信号,控制电路开通时间和功率器件通断,实现均衡控制。

储能组件的选择主要依据单体电池电压和容量、开关管最高工作频率 f 选定,还需考虑开关管、电感和回路的损耗,即获取最大均衡电流(实际可选取 $0.05C$)。本文选用锂电池容量 $60AH$,限制电池电压 $3.35V$,最大均衡充电电流 $3A$,最大 $D_{on}50\%$,最高工作频率 $f=10kHz$,据此计算出电感 L 值。

2.1 静态均衡过程中的能量转移

该电路在电池工作过程中,具有静态和动态两种工作模式。静态模式为电池不充电时的均衡,启动均衡时,将高电压的单体电池能量转移,均衡的能量主要由高电压的单体电池 B_i 提供,能量转移过程如下:

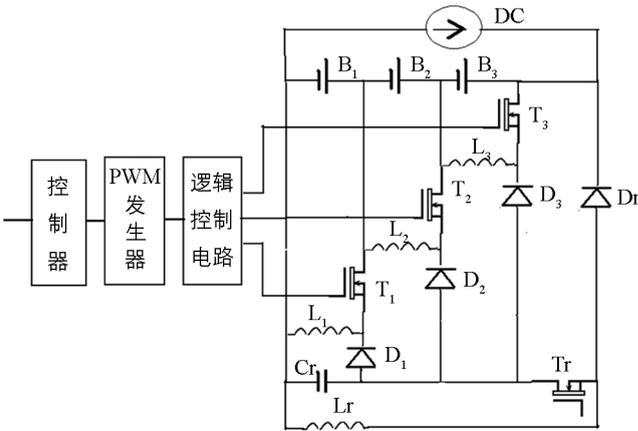


图3 均衡控制器结构

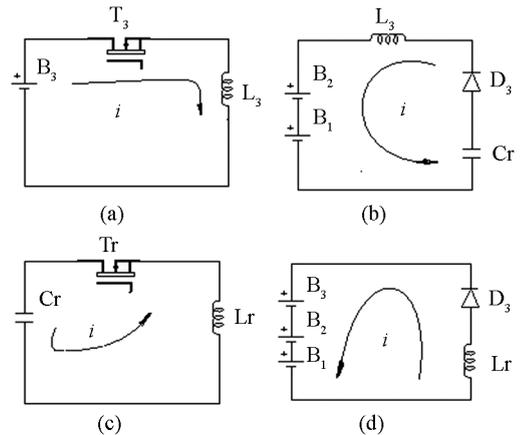


图4 均衡控制的能量转移过程

1) 设 V_{B_i} 为第 i 节电池的电压, V_e 为电池组的平均电压。当 $V_{B_i} > V_e$ 时, T_i 开通,电池 B_i 的多余电量转移到电感 L_i 上(如图4a);忽略 T_i 的压降,把它看成理想开关,此时流过 T_i 的电流值为:

$$i_{T_i} = \frac{V_{B_i}}{L} D_{on} t \quad 0 < t < D_{on} T \quad (1)$$

式(1)中, D_{on} 为PWM控制信号占空比; T 为PWM控制信号周期。

2) 当 T_i 关断时,由电感 L_i 、下级电池 $B_{i+1} \cdots B_n$ 、中间电容 C_r 、续流二极管 D_i 、 L_i 构成放电回路(图4b),而 L_i 的电便能转移到下游的电池和 C_r 上。

3) 当电容电压 V_{C_r} 值超过设定值时,开通 T_r , C_r 的电量转移到 L_r 上(图4c),当 T_r 关闭时,电量通过 D_r 回馈回充电组(图4d),利用本组能源实现组内能量的转移和能量均衡。

2.2 动态均衡过程中能量的释放和补充

动态均衡模式指电池组处于外部电源充电时的能量变化情况。电池组存在两个回路电流(图5),一个把高电压的单体电池上能量释放,另一个是外部电源对低电压的单体电池能量补充充电。在充电均衡过程

中, 当 T_i 开通时, 电池 B_i 通过 L_i 短接放电, 在电池 B_i 的多余电量转移到电感 L_i 上的同时, 充电电源 DC 也通过 L_i 和 T_i , 对下游电池 $B_{i+1} \cdots B_n$ 充电, 完成均衡过程. 此时, L_i 储存能量包括 B_i 和充电电源 DC 的能量. 通过动态仿真波形分析, L_i 能量将通过中间 T_r 、 C_r 回馈到电池组. 因此, 在同样的控制方式下, 动态均衡比静态均衡用时少.

动态均衡控制的过程(图 6)是电池能量释放和补充的过程, 其动态均衡工作模式如图 6(a). 当 PWM 脉冲上升沿来到 t_1 时, T_3 开通, 高电压电池 B_3 经过 T_3 和 L_3 后产生放电电流 i_{B_3} ; 而本组充电电源 DC 也经 T_3 和 L_3 , 对下游电池 B_2 、 B_1 充电, 产生充电电流 i_{B_2} (i_{B_1}); 当 PWM 脉冲上升沿到来, T_3 立即开通; 由于电流 i_L 不能突变, 电流 i_L 逐步上升到最大, 储存能量为两个回路能量之和; PWM 脉冲下降沿来到 t_2 时, T_3 关断, 储存在 L_3 中的能量对下游电池 B_2 、 B_1 放电, 形成电流 i_{CR} , 该电流对中间电容 C_R 充电, 电容电压随着每次均衡过程逐渐增加, 完成能量转移.

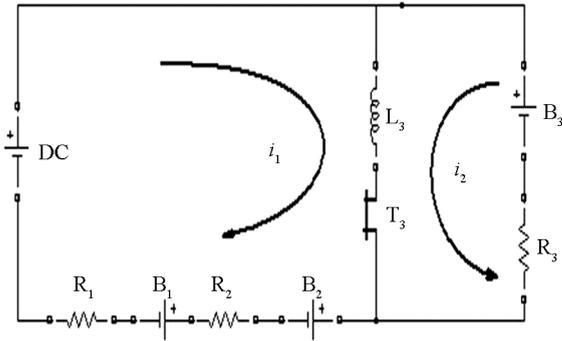


图 5 动态均衡控制的能量转移

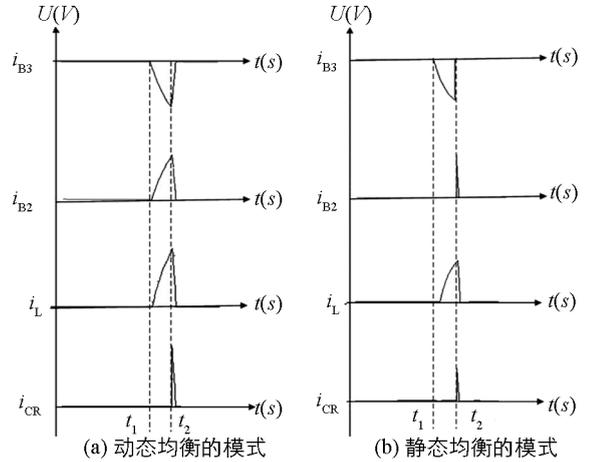


图 6 系统均衡工作模式

静态均衡工作模式如图 6(b). 随着 PWM 脉冲触发, t_1 时刻 T_3 开通, 高电压电池 B_3 通过回路 1 放电, 但未对下游电池充电; T_3 关断后, 储存在 L_3 中的能量, 通过 T_3 对下游电池 B_2 、 B_1 充电, 产生一个正的脉冲电流 i_{B_2} (i_{B_1} 相同). 储存在 L_3 的能量仅仅是 B_3 释放的能量, 而电感 L_3 的电流变化幅度、 C_r 电容放电电流 I_{CR} 和释放的能量都比动态均衡时要小.

回路 1 中的电流 i_1 由式(2)决定, 回路 2 中的电流 i_2 由式(3)决定, 通过电感的电流为两者之和如式(4). 均衡过程中, L 的储备电量为电流对时间的积分如式(5).

$$i_1(t) = \frac{V_{dc}(t) - V_L(t) - V_T(t) - V_{B_2}(t) - V_{B_1}(t)}{R_2 + R_1} \quad 0 < t < D_{on}T \quad (2)$$

$$i_2(t) = \frac{V_{B_3}(t) - V_L(t) - V_T(t)}{R_3} \quad 0 < t < D_{on}T \quad (3)$$

$$i_L(t) = i_1(t) + i_2(t) \quad (4)$$

$$Q_L(t) = \int i_L(t) dt \quad (5)$$

式(2)(3)中, V_{dc} 充电电源电压, V_L 电感电压, V_T 开关开通时的压降, V_{B_3} 、 V_{B_2} 、 V_{B_1} 为电池电压, R_3 、 R_2 、 R_1 为电池等效内阻. 选取 $L = 1 \text{ mH}$, $D_{on} = 0.15$, $T = 0.01 \text{ s}$, $V_{dc} = 10 \text{ V}$, 启动均衡时刻, $V_{B_3} = 3.16 \text{ V}$, $V_{B_2} = 3.07 \text{ V}$, $V_{B_1} = 3.03 \text{ V}$, 取 $V_T = 1$, $R_1 = 1 \Omega$, 在最大电流峰值时, 电感直流压降 $V_L = 0.87 \text{ V}$, 得出一组动态均衡的仿真电流, 如图 7 所示. 根据式(2)、(3), 计算回路 1 和回路 2 的最大电流峰值 i_{1m} 、 i_{2m} 和流过电感的电流峰值 i_{Lm} , 结果如下:

$$i_{1m} = (10 - 0.87 - 1 - 3.07 - 3.03) / 2 = 1.02 \text{ A} \tag{6}$$

$$i_{2m} = (3.16 - 0.87 - 1) / 1 = 1.29 \text{ A} \tag{7}$$

$$i_{Lm} = I_{1m} + I_{2m} = 1.15 + 1.29 = 2.31 \text{ A} \tag{8}$$

动态充电模式如图 7 所示, 随着一组 PWM 脉冲触发开关, 电流流经高电压电池 B_3 和低电压电池, 储能电感 L_3 和中间电容. 结果表明仿真图形与计算结果是基本符合的(其中迭加充电电流后, 使 i_{B_3} 和 i_{B_2} 的启始电流不为零).

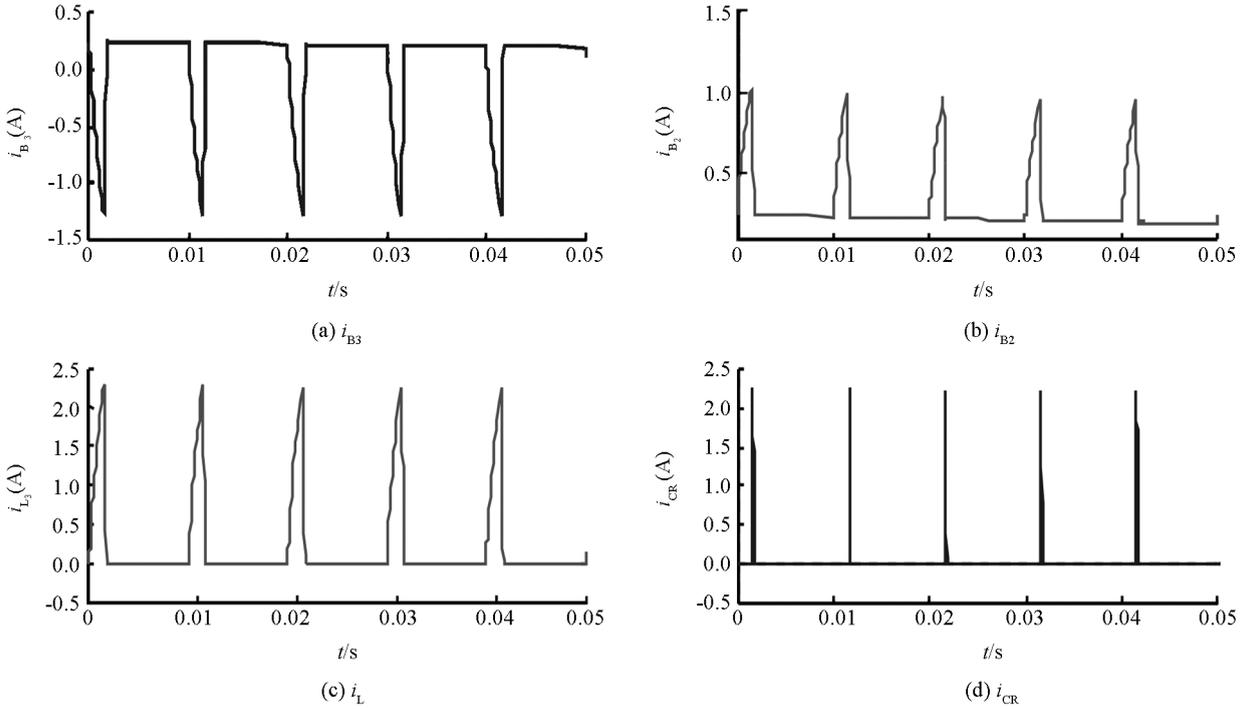
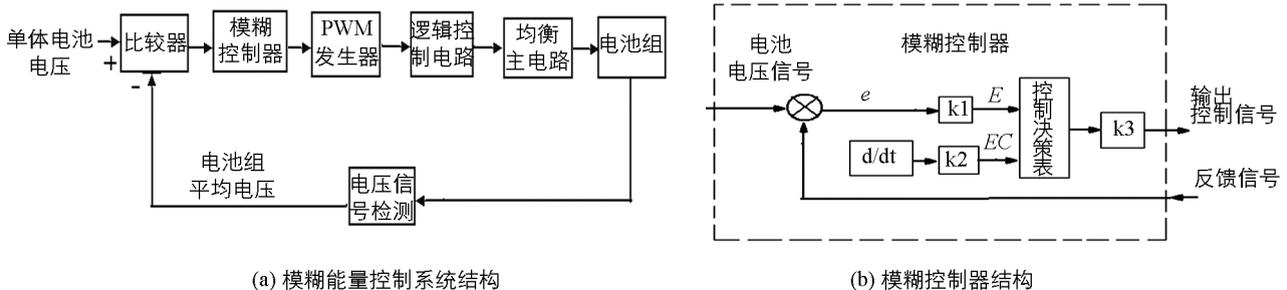


图 7 均衡电路的电流波形

3 均衡过程模糊控制的算法设计

电池组电压均衡过程中, 当单体电压高于电池组平均电压的电池能量时, 须对转移释放强度进行控制. 能量转移过程是一个复杂的动态过程, 电池参数不断变化, 且充电和均衡相互影响, 均衡的幅度和时间只有根据单体电池电压和平均电压的差值大小来决定.

合理的控制算法可提高自动控制系统动态响应过程的性能, 减少控制过程中超调量, 使响应时间最短, 即控制策略和算法设计决定均衡系统的性能. 该系统选择模糊控制方法作为控制策略, 控制能量释放和转移过程, 系统结构如图 8. 检测单体电池的电压与电池组平均电压信号的偏差, 依据控制策略和算法, 获得输出量, 改变开关的 PWM 占空比或者频率, 控制开关导通时间, 有效控制均衡响应过程.



(a) 模糊能量控制系统结构

(b) 模糊控制器结构

图 8 模糊能量控制系统

模糊控制器如图 8 所示,完成输入信号模糊化、知识库模糊推理和模糊判决,得到精确控制变量^[7].为提高指令周期,满足快速系统的实时控制要求,选用脱机方式;即预先根据模块控制的结构和算法计算出控制决策表,将实时控制的复杂推理运算简化为查表运算^[8],只需计算量化因子和比例因子得出控制决策表,大大提高了系统响应速度.

3.1 量化因子和比例因子计算和模糊化

单体电池的电压 V_B 、电池组平均电压 V_{er} 的回馈信号偏差 e 和偏差变化率 ec 作为模糊控制器的输入变量.输入变量模糊化后,生成模糊向量 E 、 EC ,分别对应偏差 e 和偏差的变化率 ec 映射到模糊子集所在的论域值.均衡电路只需对电池组中电压高于电池组平均电压的电池进行放电.因此,本系统的输入偏差 e 始终大于零.

如图 9 所示,输入偏差变量和输出变量的论域界定为 4 个等级(3, 2, 1, 0),模糊量的语言值对应为 4 文件:PB、PM、PS、ZE.模糊控制器的输入变量偏差变化率的论域界定为 7 个等级(-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3).偏差变化率及控制量的模糊量的语言值分为 5 文件:NB、NM、ZE、PM、PB.模糊子集的隶属度函数的形状选用三角形波形的隶属度函数对 E 、 EC 、 U 进行赋值.

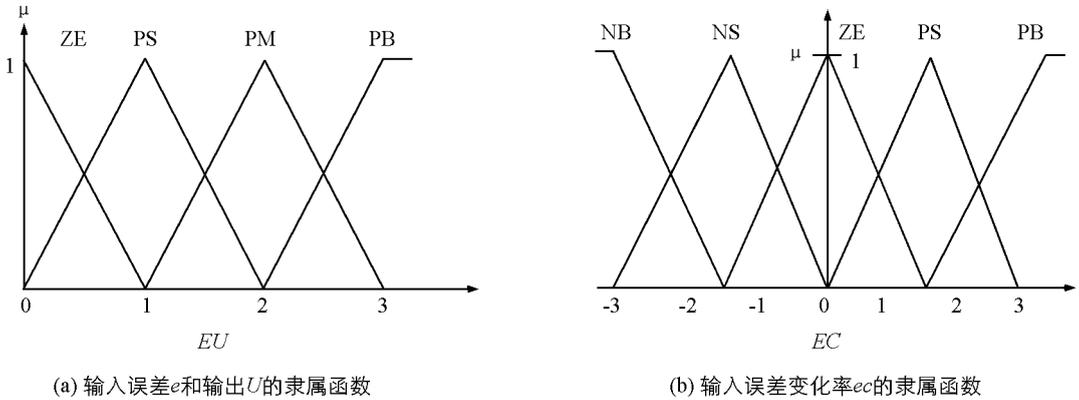


图 9 变量的隶属函数

选取电池最大允许偏差 0.5 V,最小 0.03 V,输入偏差变量和控制量变化范围 $[0, 3]$,偏差变化率变化范围 $[-3, 3]$,据此可以计算量化因子 K_1 、 K_2 和比例因子 K_3 ,在调试中通过调整来确定.通过计算量化因子和比例因子,完成变量模糊化.

3.2 控制决策表设计

决策表设计推理机制,通过控制规则和完成模糊推理及反模糊化求出控制量^[9-10].首先,建立模糊规则,采用 Larsen 推理方法,再根据代数积定义模糊蕴涵关系,选择“极大与极小”运算作为合成运算,求出合成推理结果.最后,采用重心法即加权平均法实现反模糊化,得出控制量.

在实际系统中,只需得到一张模糊控制表,根据模糊规则计算出电池电压的偏差、偏差变化率整数元素,能迅速通过查表算法,计算对应的输出量.在频率 f 不变的条件下,控制 PWM 占空比和开关导通时间,完成能量的转移和均衡,并控制系统的响应过程;同时,改变系数 K_1 、 K_2 和 K_3 也能改变系统的响应速度.

4 仿真结果

仿真系统模拟电池在均衡过程中的充、放电过程,验证所设计均衡器的均衡功能实现的可靠性.在 Matlab 环境下应用 Simulink 工具包,建立电动势与电阻串联的电池模型.根据实验资料拟合,得出电池电动势与电池存储电量 SOC 的对应关系的函数,模拟电池在均衡过程中电池电动势的变化.

动态均衡响应的仿真结果如图 10 所示,静态均衡响应的仿真结果如图 11 所示.图中 y 轴表示电池的

端电压, x 轴表示单位时间的个数, 图中的3条曲线分别表示了3节初始电压不同的电池的端电压(V_{B_1} , V_{B_2} , V_{B_3})在充电过程中的变化, 用于比较两种均衡过程的响应时间. 其中, 图10(a)为固定PWM系统响应, 图10(b)为可变PWM的模糊控制系统响应.

启动均衡模块后, 当电池电压大于平均电压, 系统立即进入均衡过程. 改变脉冲发生器的周期或占空比, 即可改变均衡的响应过程. 显然, 采用模糊控制的动态响应特性优于固定PWM占空比的特性, 当误差大时均衡的力度强, 接近控制误差范围时, 均衡的力度减弱, 均衡过程平稳, 均衡时间和控制精度基本相同.

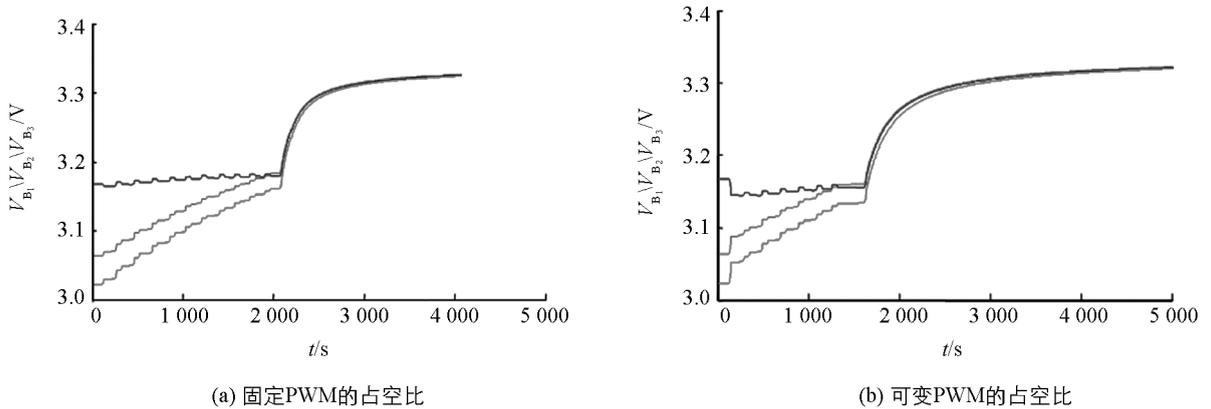


图10 不同控制信号下的系统动态均衡响应动态过程

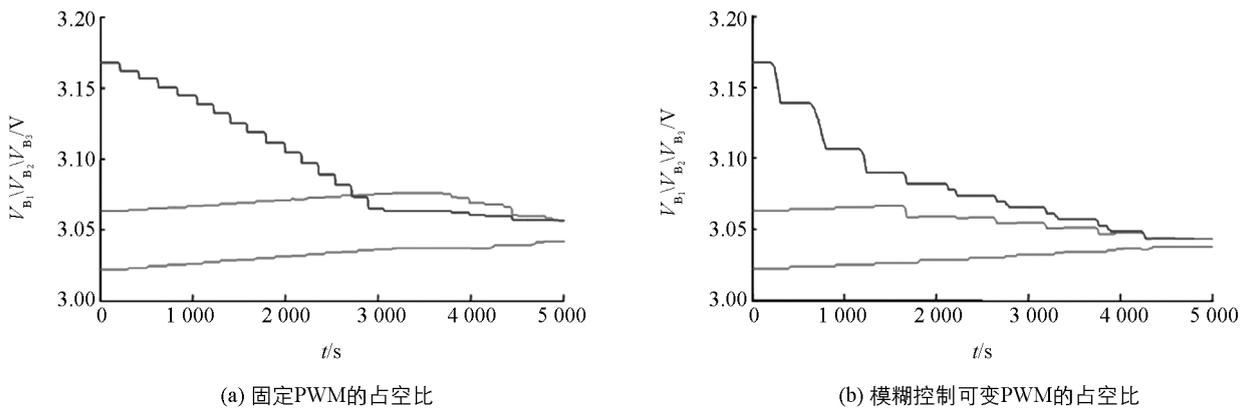


图11 不同控制信号下的系统静态均衡响应动态过程

5 结束语

本文提出了电动汽车充电站两级框架, 设计了均衡系统的控制方式和拓扑结构, 采用分组充电和均衡控制的方式, 有效地进行电池组合, 可满足不同电压值动力需求. 同时, 系统结合主动均衡和能量回馈的方式, 对电池组进行有效保护, 提高了能源的利用率; 在分析系统均衡原理的基础上, 设计了一种实用的控制算法, 对响应过程进行自动控制, 实现均衡功能, 优化了均衡控制的质量. 仿真结果表明, 该系统具有合理性和可行性, 对电动汽车充电站建设提供了崭新的研究方向.

参考文献:

- [1] 赵国才. 汽车节能技术路径分析 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2014, 39(12): 117-121.
- [2] 中华人民共和国科学技术部. 电动汽车科技发展“十二五”专项规划 [Z]. 2012-03-27.
- [3] 滕乐天. 电动汽车充电机(站)设计 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

- [4] 侯 兵, 俞 宁, 周康渠. 纯电动汽车发展规模的系统动力学分析与仿真 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2014 (12): 23—29.
- [5] 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, 2013, 41(10): 1547—1549.
- [6] 许爱国, 谢少军, 刘小宝. 串联电容器动态电压均衡技术研究 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12): 111—112.
- [7] 诸 静. 模糊控制理论与系统原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [8] 张志远, 万沛霖. 一种用于电动车辆驱动控制的模糊控制系统设计 [J]. 电机与控制学报, 2005, 9(3): 203—206.
- [9] ZHANG Z, ZHANG J, CHENG Y. A Fuzzy Control System Design Based on Double Module Structure [J]. *Mechatronics, MEMS, and Smart Materials*, 2007: 6794—6798.
- [10] 邓 涛, 孙 欢. 锂离子电池新型 SOC 安时积分实时估算方法 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学): 2015, 29(1): 101—106.

Research on an Intelligent Control System of Active Equalization for Charging Stations of Electric Vehicles

ZHANG Li¹, ZHANG Jie²

1. Dept. of Electronic Information and Automation, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. Dept. of Economy and Trade, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

Abstract: This paper presents an intelligent active equalization system for electric vehicle charging stations. It uses a topology structure of combination of centralization and decentralization, and an equalization mode of release and supplementation to equalize battery energy. Inductance and capacitor are applied to store up energy and transfer energy for feedback of energy, and the fuzzy control technique is applied to control the equalization process in the system. Simulation results show that the system can realize the equalization of power batteries under charging or no-charging condition, and meet the requirements of electric vehicle charging stations.

Key words: charging station; power battery; active equalization; fuzzy control

责任编辑 汤振金

