

1-8-2019

A Simulation Study of Power Battery Grouping Equalization System

Zhu Hao

Hunan University, School of Mechanical and Transportation Engineering, Changsha 410000, China;

Daxing Xia

Hunan University, School of Mechanical and Transportation Engineering, Changsha 410000, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

A Simulation Study of Power Battery Grouping Equalization System

Abstract

Abstract: *A grouping equalizer scheme of lithium-ion battery pack is proposed based on cuk chopper circuit and flyback transformer balanced circuits. The grouping equalizer process could be divided into two stages: balance of cell sub-group and balance between cell sub-group. Cuk chopper circuit is used in the balance of cell sub-group for transferring the energy between adjacent cells. Bidirectional flyback transformer is employed in the balance between cell sub-group. Any optional sub-group can be balanced and the balanced energy can be transferred bidirectionally. Finally, a balanced circuit model is created in Matlab/Simulink for simulation. Simulation results show that the grouping equilibrium system of battery pack could efficiently balance while charging and discharging the battery pack. *The grouping equilibrium system not only avoids the shortcomings when balancing individually, but also increases the charge and discharge capacity of the entire battery pack.**

Keywords

cuk chopper circuit, flyback converter, grouping equilibrium system, capacity, simulation

Recommended Citation

Zhu Hao, Xia Daxing. A Simulation Study of Power Battery Grouping Equalization System[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3484-3492.

一种动力电池组分组式均衡系统仿真研究

朱浩, 夏达兴

(湖南大学机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410000)

摘要: 基于 Cuk 斩波电路和反激式变换器均衡电路提出了一种锂离子动力电池组分组式均衡方案。分组式均衡过程可以分为两个阶段: 电池子组内均衡和电池子组间均衡。电池子组内均衡采用 Cuk 斩波电路, 实现相邻电池间电荷快速转移。电池子组间均衡采用的是双向反激式变换器, 可以实现被均衡电池子组任意可选, 均衡能量双向传递。在 Matlab/Simulink 中建立均衡电路模型进行仿真验证, 所述电池组分组式均衡系统能在电池组充放电期间进行高效均衡。不仅改善了两种各自均衡的缺陷, 同时提高了整个电池组的充电容量及放电容量。

关键词: 斩波电路; 反激式变换器; 分组式均衡; 容量; 仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 09-3484-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809033

A Simulation Study of Power Battery Grouping Equalization System

Zhu Hao, Xia Daxing

(Hunan University, School of Mechanical and Transportation Engineering, Changsha 410000, China)

Abstract: A grouping equalizer scheme of lithium-ion battery pack is proposed based on cuk chopper circuit and flyback transformer balanced circuits. The grouping equalizer process could be divided into two stages: balance of cell sub-group and balance between cell sub-group. Cuk chopper circuit is used in the balance of cell sub-group for transferring the energy between adjacent cells. Bidirectional flyback transformer is employed in the balance between cell sub-group. Any optional sub-group can be balanced and the balanced energy can be transferred bidirectionally. Finally, a balanced circuit model is created in Matlab/Simulink for simulation. Simulation results show that the grouping equilibrium system of battery pack could efficiently balance while charging and discharging the battery pack. The grouping equilibrium system not only avoids the shortcomings when balancing individually, but also increases the charge and discharge capacity of the entire battery pack.

Keywords: cuk chopper circuit; flyback converter; grouping equilibrium system; capacity; simulation

引言

在纯电动汽车中, 往往需要将多节单体电池通过串并联后形成动力电池组为其提供能量。由于受

电池生产过程和工作环境的影响, 电池组会出现不一致性现象, 其不一致性表现形式主要有容量不一致, 电阻不一致及电压不一致。而电池组的不一致性会造成成组电池使用性能的下降, 降低电池组的可用容量和使用寿命, 继而缩短了纯电动汽车的续航里程, 增加使用成本^[1]。所谓均衡控制主要是利用均衡拓扑电路加入制定的均衡策略来实现电池组内单体电池能量的平衡。如果不对电池做均衡控



收稿日期: 2016-11-21

修回日期: 2017-01-21;

基金项目: 湖南省教育厅优秀青年基金(08B042);

作者简介: 朱浩(1972-), 男, 湖南, 博士, 副教授, 研究方向为车辆动力学和电动汽车技术; 夏达兴(1991-), 男, 湖北仙桃, 硕士, 研究方向为新能源与电动汽车。

<http://www.china-simulation.com>

• 3484 •

制, 电池管理系统的保护机制会在电池组中的某一个电池充满电的时候就对整个电池组截止充电, 同样, 在剩余电量最小的电池放完电的时候就对整个串联电池组截止放电, 这样就会造成整个电池组的容量不能有效发挥。由于电池过充和过放都会发生不可逆转的化学反应, 从而影响电池的寿命。因此需要加入均衡控制管理, 不仅可以提高动力电池组的有效能量, 还可以控制动力电池的充放电深度^[2]。

目前串联动力电池组均衡的方法分为两种: 能量耗散式均衡(被动均衡)和能量非耗散式均衡(主动均衡)。能量非耗散式均衡拓扑结构多是利用储能元件及所搭建的均衡外电路实现电池间能量的相互传递或转移, 一般可分为电容型、变换器型(电感型)、变压器型三种, 其中变换器型和变压器型均衡拓扑结构可以通过改变占空比改变输出电压, 又可称之为 DC-DC 型^[3]。电容型均衡^[4]实现能量在相邻两单体电池之间转移, 需要依靠单体电池间的电压差进行能量均衡, 而实际单体锂离子电池间的电压差才几百毫伏, 再加上开关管压降, 能量就很难转移了。Buck-boost 均衡电路^[5]和 Cuk 斩波电路电荷只能在相邻电池间转移, 适合应用在串联电池数目较少时, 其均衡效果显著, 而串联电池数量较多时, 均衡效率会大大降低。Cuk 斩波电路由于具有两个均衡回路, 在相邻的两个单体电池均衡时具有连续的放电电流和充电电流, 因此能量转移效率高^[6]。反激式变换器均衡可以实现能量在单体电池与电池组间的双向流动, 无论充电均衡还是放电均衡, 其均衡效果显著^[7]。但是也存在很多缺点, 反激式变换器自身体积太大, 每个电池配备一个变换器导致均衡电路过于庞大, 而且过多的变换器还会加剧漏感现象^[8]。

针对电动汽车动力电池组上百节电池的应用场合, 如果像文献[9]仅使用 Cuk 均衡电路或者仅用多变压器均衡电路来进行均衡显然不明智。在长串电池组中使用 Cuk 均衡时, 能量在相邻电池间不断转移会有很多能量损失。而只使用变压器则体

积庞大, 成本太高^[10]。因此基于 Cuk 均衡电路和反激式变换器均衡电路提出了一套新型的分组式均衡方案。该均衡电路在保证具有 Cuk 均衡电路和反激式变换器均衡电路优点的同时, 一定程度的缩小了它们各自的缺点。

1 电池组均衡系统

根据车辆动力性需求可以把整个动力电池组分成若干电池子组, 每个电池子组由若干个单体电池组成。设计的电池组能量均衡系统结构如图 1 所示。采取分组均衡策略, 首先把整个串联动力电池组中所有的 N 节电池分成 N/M 组, 每个电池子组有 M 节电池。在电池子组中均衡, 运用的是 Cuk 均衡法对 M 节电池进行均衡。在电池子组间均衡, 把电池子组看成一个整体, 运用多变压器法进行均衡, 共使用 N/M 个双向反激式变换器。

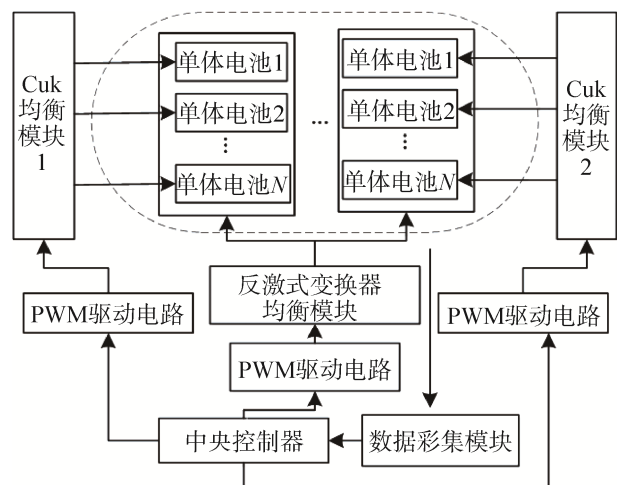


图1 均衡系统整体结构

Fig. 1 Overall structure of the balanced system

2 均衡电路分析

2.1 cuk 均衡电路分析

图2为电池子组内均衡拓扑电路, 通过电容储能可以使能量在相邻的两个单体电池之间双向流动, 要使电荷由电池1向电池2转移只需对开关Q1进行控制, 同理可以控制开关Q2使电荷由电池2向电池1转移。

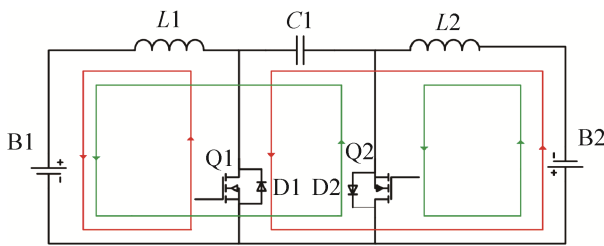


图2 电池子组均衡电路
Fig. 2 Equalization circuit of battery sub-group

设 $Q1$ 的开关周期为 T , 导通期为 T_{on} , 截止期为 $T_{off}=T-T_{on}$, 导通占空比为 $D=I_{on}/T$ 。当检测到 $SOC_{B1}>SOC_{B2}$ 时, 控制器把 PWM 信号加到 $Q1$ 上, 此时 $B1$ 向 $B2$ 转移能量。当检测到 $SOC_{B1}<SOC_{B2}$ 时, 则相反。过程如下:

(1) 在 T_{on} 期间, 开关 $Q1$ 导通, 把输入输出环路闭合, 如图 2。二极管 $D2$ 反偏截止。这时 $B1$ 流出的电流 I_1 使电感 $L1$ 储能; 电容 $C1$ 放电电流 I_2 使 $L2$ 储能, 并向 $B2$ 充电转移能量。

(2) 在 T_{off} 期间, 开关 $Q1$ 截止, 二极管 $D2$ 正偏而导通, 输入输出回路闭合, 如图 2。这时 $B1$ 和 $L1$ 感应电势相加向 $C1$ 充电, $C1$ 储能; $L2$ 释放能量, 其电流 I_2 向 $B2$ 充电。

因此我们对一个 MOSFET 开关进行 PWM 控制, 就可保证均衡能量传递的连续性, 控制起来也相对简单。

2.2 双向反激式变换器均衡电路分析

双向反激式变换器是一种在单向反激式变换器基础上改进的反激式变换器, 用双向的开关替代了原变换器中的二极管, 其电路结构如图 3 所示。

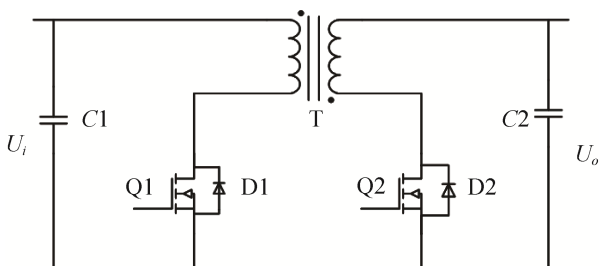


图3 双向反激式变换器
Fig. 3 Bidirectional flyback converter

双向反激式变换器不仅能够实现能量从输入端到输出端的正向转移, 还能实现输出端到输入端的反向转移。当要实现能量的正向转移时, 利用 PWM 方式来控制开关 $Q1$, 而 $Q2$ 始终处于不控状态, $Q2$ 的体二极管 $D2$ 起到续流作用; 反之, 当要实现能量的反向转移时, 利用 PWM 方式来控制开关 $Q2$, 而 $Q1$ 始终处于不控状态, $Q1$ 的体二极管 $D1$ 起到续流作用。下面就连续导通模式作简要分析。

(1) T_{on} 期间:

开关 $Q1$ 打开, 电池 1 电压 U_i 加到初级绕组 W_1 之上, 次级绕组 W_2 产生感应电动势 U_{w2} :

$$U_{w2} = -\frac{W_2}{W_1} U_i \quad (1)$$

体二极管 $D2$ 受到反向电压而截止。在这个阶段, 初级绕组等同于一个电感, 则电流的增长率为:

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{U_i}{L_1} \quad (2)$$

式中: L_1 为电感量;

在 $t=T_{on}$ 时, 电流 I_p 达到最大值:

$$I_{p\max} = I_{p\min} + \frac{U_i}{L_1} D T_s \quad (3)$$

式中: $I_{p\min}$ 为初始电流值, D 为开关 $Q1$ 驱动 PWM 的占空比。此阶段, 变压器把电能转换成磁能, 磁通量的增加量为:

$$\Delta\Phi_{(+)} = \frac{U_i}{W_1} D T_s \quad (4)$$

(2) $T_{on}-T_s$ 期间:

开关 $Q1$ 关闭, 初级绕组无电流通过, 次级绕组上的感应电动势方向, 体二极管 $D2$ 受到正向电压而导通, 线圈中的磁能转化成电能, 通过 $D2$ 释放能量给电池 2。在这个阶段, 次级绕组也相当于一个电感, 设电感量为 L_2 , 其电流的下降率为:

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{U_o}{L_2} \quad (5)$$

在 $t=T_s$ 时刻, 电流 I_s 达到最小值:

$$I_{s\min} = I_{s\max} + \frac{U_o}{L_2} (1-D) T_s \quad (6)$$

式中: $I_{s\max}$ 为初始电流值, U_o 为输出电压, 其值等

于 U_{w2} 。此阶段, 变压器把磁能转化为电能, 磁通量减少量为

$$\Delta\Phi_{(-)} = \frac{U_o}{W_2}(1-D)T_s \quad (7)$$

变压器在工作时必须遵循磁通复位原则, $\Delta\Phi_{(+)} = \Delta\Phi_{(-)}$, 再由式(4)和式(7)可得

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{W_2}{W_1} \frac{D}{1-D} \quad (8)$$

从式(8)可以得知, 连续导通模式下, 反激式变换器的输出电压与初、次级绕组的匝数比、开关驱动信号的占空比 D 、输入电压 U_i 有关; 可以计算次级绕组电流平均值:

$$I_o = \frac{1}{2}(I_{s \min} + I_{s \max})(1-D) \quad (9)$$

由变压器工作原理可得

$$W_1 I_{p \min} = W_2 I_{s \min} \quad (10)$$

$$W_2 I_{p \max} = W_1 I_{s \max} \quad (11)$$

据上面两式及(3)可得

$$I_{s \max} = \frac{1}{1-D} I_o + \frac{W_1 U_i}{W_2 L_1} D T_s \quad (12)$$

多变压器法是利用双向反激式变压器作为能量载体, 通过电能与磁能之间的转换, 使能量在单体电池与电池组之间形成双向转移, 从而达到能量的平衡。如果把电池子组看成一个整体, 运用多变压器法进行均衡, 共使用 N/M 个双向反激式变换器。其均衡电路如图 4 所示。T1, T2, T3 为双向反激式变压器, Q11-Q32 为用于均衡控制 MOSFET, D11-D32 为续流二极管。

电路的工作原理: 如图 4 所示, 充电过程中, 以电池子组 1 的能量偏高为例, 均衡过程分为两个阶段。第一阶段, 开启 Q12, 子组 1 中“多余”的能量以磁能的形式存储在变压器 T1 的初级电感中, 次级绕组上的感应电压由于 D11 的反向偏置而被阻断; 第二阶段, 关闭 Q12, 初级绕组两端电压极性反向, 次级绕组上的电压极性也同时反向, 促使 D11 导通, 存储在变压器中的能量以电能的形式释放到电池整组中。放电或静置过程中, 以电池子组 2 的能量偏低为例, 同样, 均衡过程分为两个阶段。

第一阶段, 开启 Q21, 来自电池整组中的能量以磁能的形式存储在变压器 T2 的次级电感中, 初级绕组上的感应电压由于 D22 的反向偏置而被阻断; 第二阶段, 关闭 Q21, 次级绕组两端电压极性反向, 初级绕组上的电压极性也同时反向, 促使 D22 导通, 存储在变压器中的能量以电能的形式释放到电池子组 2 中。

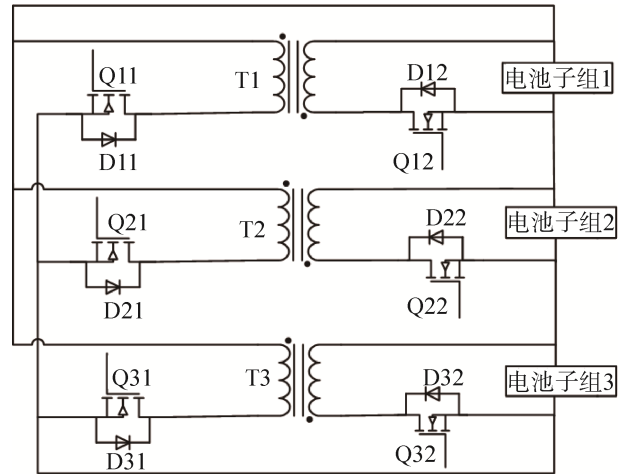


图 4 分组式均衡电路图

Fig. 4 Grouped equalization circuit diagram

3 均衡策略流程图

均衡的判决策略是对均衡起止时间的一个判定过程, 是系统均衡的先决条件。由于受电池原材料, 生产工艺及环境因素的影响, 电池的 SOC 不可能完全相同, 因此需要制定一个均衡门限值, 当某节电池的 SOC 在 $(SOC_v - dSOC, SOC_v + dSOC)$ 内, 则认为该电池能量相对平衡。故当某节电池 SOC 高出 $(SOC_v + dSOC)$ 或者低于 $(SOC_v - dSOC)$, 则认为电池处于相对不平衡状态, 需要进行均衡。因此, 电池不平衡状态可以分为三种: 大多数电池处于同一水平, 只有个别电池高出均衡门上限; 大多数电池处于同一水平, 只有个别电池低于均衡门下限; 大多数电池处于同一水平, 既有电池高于均衡门上限, 又有低于均衡门下限。由于所设计的均衡系统是分组式均衡系统, 故均衡控制过程分两个阶段进行, 即电池子组内均衡和电池子组间均衡, 这与一

般的均衡控制只有一个阶段有所不同。其均衡策略如图5所示。

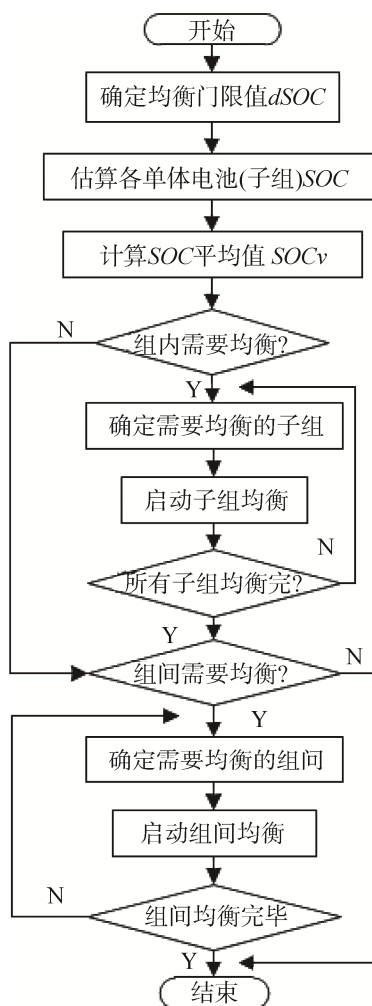


图5 控制策略
Fig. 5 Control strategy

4 模型的建立

如图6为磷酸铁锂动力电池的等效电路模型。它由等效电压源和等效阻抗两部分组成,不仅准确反映了磷酸铁锂动力电池的回弹电压特性,还加入了磷酸铁锂电池的滞回电压特性,使模型更加完善。该模型不仅实时地得到电池的工作电压 V_B , 开路电压 OCV , 还可以实时、直接地估算出电池的 SOC 值。采用 Matlab/Simulink 里的标准模块以及部分电路元器件来实现电池模型。图6中 EMF 是 V_{SoC} 的函数, V_h 是 SoC 与电流 I_b 的函数, V_{SoC} 是电容两端电压表示电池的剩余容量 SoC , V_{SoC} 的

值在 0-1 之间。

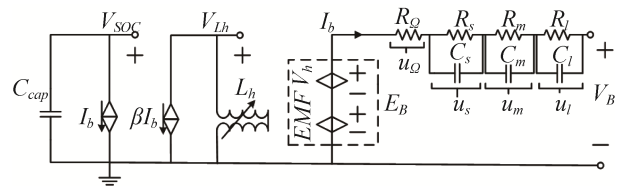


图6 动力电池新型模型
Fig. 6 New model of power battery

经过对等效电路进行电路分析后,得到等效电压源部分的数学关系,如下所示

$$\begin{cases} EMF = f_1(V_{SoC}) \\ V_h = f_2(V_{SoC}, I_b) \\ E_B = EMF + V_h \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{式中: } V_{SoC} = \text{InitialSoC} + \frac{1}{C_{cap}} \int I_b dt$$

对等效阻抗进行电路分析后,得到等效阻抗中各个部分的电压与电流的关系,如下式所示

$$\begin{cases} \frac{1}{C_s} \cdot \frac{du_s}{dt} + \frac{u_s}{R_s} = I_b \\ \frac{1}{C_m} \cdot \frac{du_m}{dt} + \frac{u_m}{R_m} = I_b \\ \frac{1}{C_l} \cdot \frac{du_l}{dt} + \frac{u_l}{R_l} = I_b \\ u_{\Omega} = I_b R_{\Omega} \end{cases} \quad (14)$$

根据式(13)和(14)所示的等效电路中各个参数的关系,可以在 Simulink 中实现所建立的等效电路模型,图7为模型仿真实现结构图。

图7中 Simulink 模型所示的常数模块和电阻 R_{ohm} 为电池模型的参数,在此用电阻元器件表示电池的欧姆内阻。模型中 C_{cap} 为电池的额定容量; Initial SoC 为电池工作之前的初始剩余容量 SoC 的值,进行仿真之前根据需要在 0-1 之间任意设定; R_s 、 C_s 、 R_m 、 C_m 、 R_l 、 C_l 和 R_{Ω} 为对应电池等效电路模型中的等效阻抗的参数。

5 系统仿真

基于图7电池模型在 Matlab/Simulink 中搭建了均衡电路模型,如图8所示,验证分组式动力电池组能量均衡系统控制策略和均衡效果的有效性。

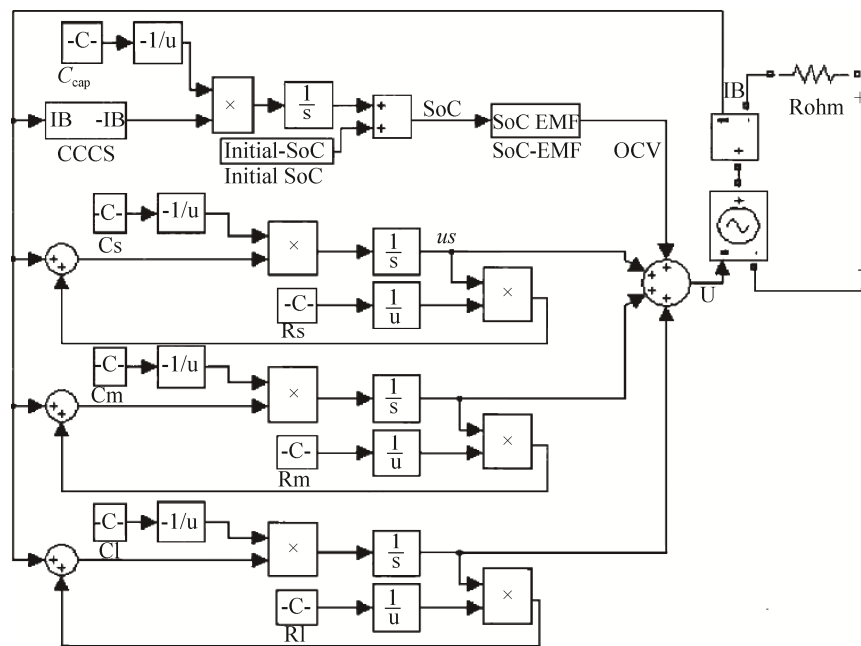


图7 Simulink 模型结构图

Fig. 7 Structure diagram of Simulink model

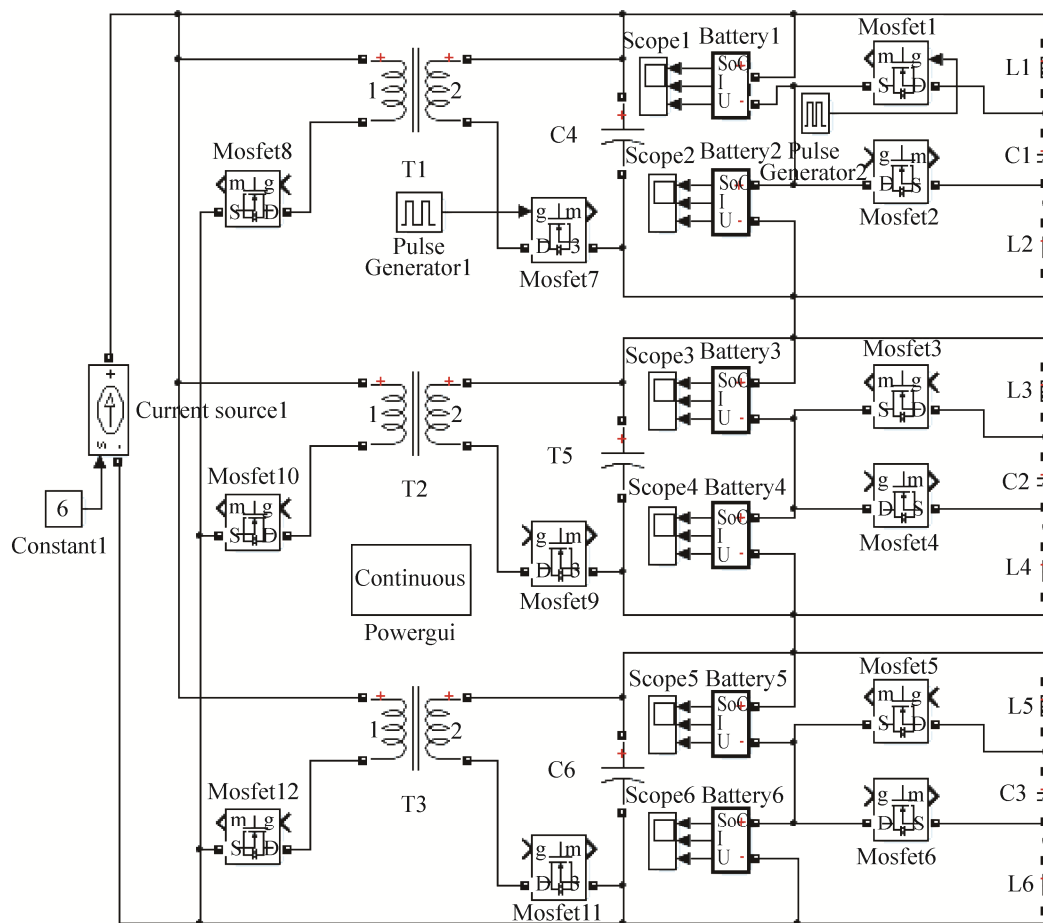


图8 电池包仿真模型图

Fig. 8 Simulation model of battery pack

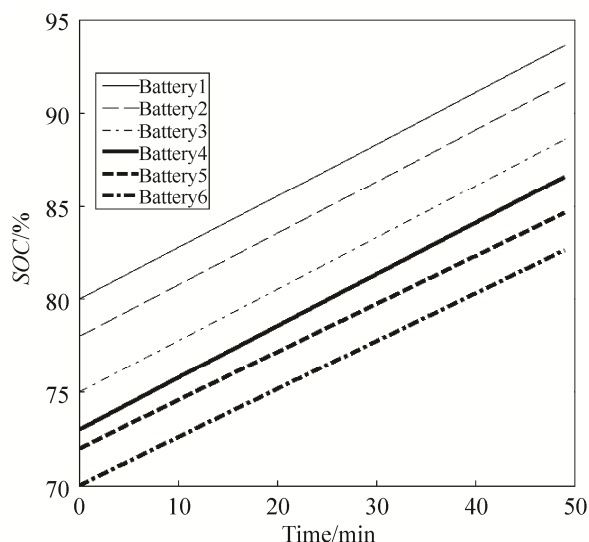
<http://www.china-simulation.com>

• 3489 •

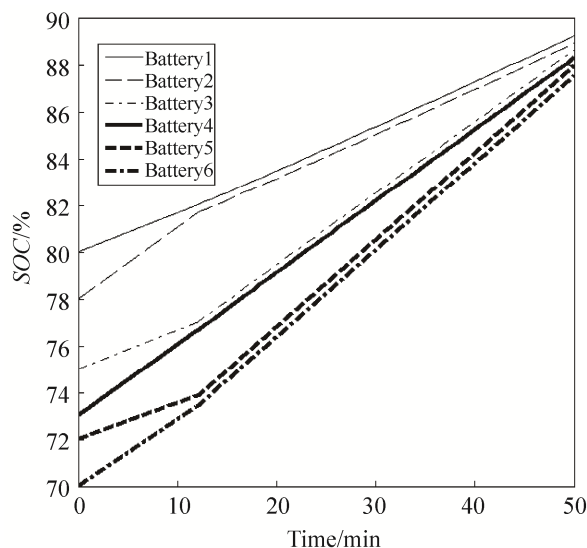
搭建的电池包仿真模型采用恒流充放电, 充电时为 $1\text{ C}(6\text{ A})$, 放电为 $-1\text{ C}(-6\text{ A})$ 。模型有三个电池子组, 每个子组内均有两个电感, 电感值设置为 $50\text{ }\mu\text{H}$ 。控制均衡的 MOSFET 共有 12 个, 电池子组内 PWM 信号的频率设置为 10 kHz , 其 PWM 信号的占空比设置为 45% , 电池子组间 PWM 信号的频率设置为 20 kHz , 其 PWM 信号的占空比根据不同情况设定。滤波电容的电容值设置为 $1147\text{ }\mu\text{F}$, MOSFET 和二极管的参数设置为默认值。

5.1 充电均衡仿真

首先对电池组的恒流充电过程进行仿真验证, 设置 6 节单体电池的 SOC 值依次为 80% , 78% , 75% , 73% , 72% , 70% , 可控电流源设置为 $1\text{ C}(6\text{ A})$ 。为了与充电均衡仿真结果形成对比, 对 6 节串联组成的电池组恒流充电。经过 50 min 后, 各单体电池 SOC 均直线上升, 由于没有添加均衡电路, 它们的上升速率相同, 都增加了 17.02% , 其仿真效果如图 9(a)所示。如果继续充电, 电池 1 的 SOC 将会最先达到 100% , 即已充满电, 而其它电池在此时却都未能充满, 于是需要添加均衡电路来调节这一状况。加入均衡电路, 系统通过脉冲发生器控制 MOSFET 进行均衡仿真, 其仿真效果如图 9(b)所示。



(a) 未加均衡充电曲线



(b) 加均衡充电曲线

图 9 充电过程均衡效果图

Fig. 9 Balance effect diagram of charge process

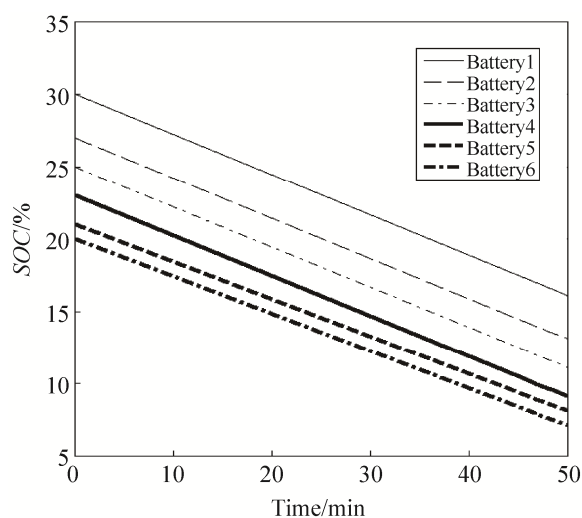
5.2 放电均衡仿真

首先对电池组的恒流放电过程进行仿真验证, 设置 6 节单体电池的 SOC 值依次为 30% , 28% , 25% , 23% , 22% , 20% , 可控电流源设置为 $-1\text{ C}(-6\text{ A})$ 。为了与放电均衡仿真结果形成对比, 对 6 节串联组成的电池组恒流放电。经过 50 min 后, 各单体电池 SOC 均直线下降, 由于没有添加均衡电路, 它们的下降速率相同, 都下降了 46.2% , 其仿真效果见图 10(a)。如果继续放电, 电池 6 的 SOC 将会最先达到 0% , 即放完, 而其它电池在此时却都未能放完, 于是需要添加均衡电路来调节这一状况。加入均衡电路, 系统通过脉冲发生器控制 MOSFET 进行均衡仿真, 其仿真效果见图 10(b)。

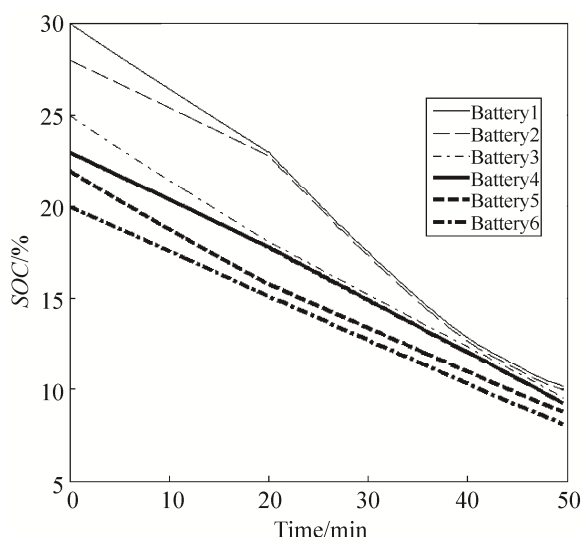
5.3 仿真结果分析

充电仿真均衡第一阶段, 由于电池 1 和电池 2, 电池 3 和电池 4, 电池 5 和电池 6 的 SOC 值差异达到了 2% 的均衡临界值, 系统对其进行能量均衡, 此过程用了 12 min 。从第一阶段的均衡结果中可以看出, 进入子组内均衡后了, B1, B3 和 B5 的 SOC 值上升明显变慢, 只上升了 2% , 而 B2, B4 和 B6 的 SOC 值上升速度却明显加快, 上升了近 4% , 此

过程中, B1, B3 和 B5 中约有 1% 的能量值转移到了 B2, B4 和 B6 中。均衡第二阶段, 整体均衡, 也就是子组间均衡, 从此阶段的均衡结果来看, 电池子组 1 的 SOC 上升速度减慢, 而电池子组 2 和电池子组 3 上升速度较快, 电池子组 1 部分能量向电池子组 2 和 3 转移。均衡第二阶段结束时, 各电池子组的 SOC 值已趋于一致, 很好地抑制了 B1, B2 可能出现的过充电现象。



(a) 未加均衡充电曲线



(b) 加均衡充电曲线

图 10 放电过程均衡效果图

Fig. 10 Balance effect diagram of discharge process

放电仿真均衡第一阶段, 由于电池 1 和电池 2, 电池 3 和电池 4, 电池 5 和电池 6 的 SOC 值差异

达到了 2% 的均衡临界值, 系统对其进行能量均衡, 此过程用了 20 min。从第一阶段的均衡结果中可以看出, 进入电池子组内均衡后了, B2, B4 和 B6 的 SOC 值下降明显变慢, 只下降了 3%, 而 B1, B3 和 B5 的 SOC 值下降速度却明显加快, 下降了近 5%, 此过程中, B1, B3 和 B5 中约有 1% 的能量值转移到了 B2, B4 和 B6 中。均衡第二阶段, 整体均衡, 也就是电池子组间均衡, 从此阶段的均衡结果来看, 电池子组 3 的 SOC 下降速度减慢, 而电池子组 1 和电池子组 2 下降速度较快, 电池子组 1 和电池子组 2 部分能量向电池子组 3 转移。均衡第二阶段结束时, 各电池子组的 SOC 值已趋于一致, 很好地抑制了 B5, B6 可能出现的过放电现象。

6 结论

(1) 建立一种新型的动力电池模型, 不仅准确反映了磷酸铁锂动力电池的回弹电压特性, 还加入了磷酸铁锂电池的滞回电压特性, 使模型更加完善, 更适用于磷酸铁锂动力电池。

(2) 分组式能量均衡系统在少量串联电池数中采用 Cuk 均衡电路, 其均衡效果显著, 相比于串联电池数目较多时, 均衡效率大幅度提高了。

(3) 分组式能量均衡系统运用更少的反激式变换器节省体积的同时节约了成本。

(4) 分组式能量均衡系统, 使均衡结构层次分明, 控制策略简单。

(5) 分组式能量均衡系统很好的抑制了动力电池组可能出现的过充和过放现象。

参考文献:

- [1] 桂宇. 纯电动汽车锂电池组双向均衡控制策略研究及系统开发[D]. 吉林: 吉林大学, 2014: 11-12.
Gui Yu. Research on Bidirectional Equalization Strategy and System Development for Lithium-ion Power Battery Pack of Pure Electric Vehicle[D]. Jilin: Jilin University, 2014: 11-12
- [2] 谭晓军. 电动汽车动力电池管理系统设计[M]. 1版. 广州: 中山大学出版社, 2011: 95-99.
Tan Xiaojun. Design of Power Battery Management

- System for Electric Vehicles[M]. 1st ed. Guangzhou: Zhongshan University Press, 2011: 95-99.
- [3] 刘红锐, 张昭怀. 锂离子电池组充放电均衡器及均衡策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 187-191.
Liu Hongrui, Zhang Zhaohuai. The Equalizer of Charge and Discharge and the Balancing Strategies for Lithium-Ion Battery Pack[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 187-191.
- [4] Baughman Andrew, Ferdowsi Mehdi. Analysis of the Double-tiered Three-battery Switched Capacitor Battery Balancing System[J]. 2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (S0159-4244), 2006, 37(19): 1-6.
- [5] 刘红锐, 李圆专, 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, 2016, 41(2): 73-75.
Liu Hongrui, Li Yuanzhan, Li Siqi, et al. Study on Equalizer for Serially Connected Battery Cells Based on Cuk Chopper Circuit[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2016, 41(2): 73-75.
- [6] 甘正飞. 动力电池组分组式均衡方案的研究与设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015: 28-29.
Gan Zhengfei. Research and Design of Grouping Equalization Scheme in Power Batteries[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015: 28-29.
- [7] Imtiaz A Mb, 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 (S0885-8993), 2013, 28(12): 5960-5975.
- [8] 武笛. 基于双向反激直流变换器的锂离子电池均衡系统仿真研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012: 67-71.
Wu Di. Lithium-ion Battery Equalization System Simulation Study on Bidirectional Flyback DC-DC Converter[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012: 67-71.
- [9] 王飞, 李波. 基于 Cuk 变换器的电池均衡控制策略分析[J]. 科技信息(科学教研), 2007, 20(3): 36-38.
Wang Fei, Li Bo. Analysis of Battery Equalization Control Strategy Based on Cuk Converter[J]. Science and Technology Information(Science & Technology), 2007, 20(3): 36-38.
- [10] Hsieh Y C, Wu J L, Chen X H. Class-E-based Charge Equalization Circuit for Battery Cells[J]. IET Power Electronics (S1755-4535), 2012, 5(7): 978-983.

(上接第 3483 页)

5 结论

侦察系统是作战仿真系统中一个非常重要的子系统, 为作战仿真提供所有敌情、地形数据。由于侦察系统的复杂性, 本文只对侦察系统建模与仿真的部分内容进行了简单描述, 提出了侦察仿真系统的模型框架及结构, 目前该系统还处于系统实施及完善阶段, 结合旅级部队的相关战法训练尽心了初步应用, 取得了较好效果。下一步主要针对侦察仿真效率及模型种类、数量方面对侦察模型进行改造, 进一步提高侦察仿真系统的效率和可信性。

参考文献:

- [1] 胡晓峰, 杨镜宇, 司光亚, 等. 战争复杂系统仿真分析与实验[M]. 北京: 国防大学出版社, 2008.

Hu Xiaofeng, Yang Jingyu, Si Guangya, et al. an Complex System Simulation Analysis & Experimentation[M]. Beijing: National Defense University Press, 2008.

- [2] 刘兆砚. 合成军队侦察情报工作概论[M]. 北京: 国防大学出版社, 2001.
Liu Zhaoyan. An Introduction to the Reconnaissance Intelligence of the Synthetic Army[M]. Beijing: National Defense University Press, 2001.
- [3] 杜英. 基于需求功能映射的装甲兵侦察概念模型构建[J]. 计算机仿真, 2007, 24(12): 13-15.
Du Ying. Construction of armor reconnaissance conception-model based on the mapping of demand function[J]. Computer Simulation, 2007, 24(12): 13-15.
- [4] 王成. 数字化机步师指挥决策模型的预案初始化研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2007.
Wang Cheng. Study on Initialization of the Preplan of Command Decision Model of Digital Mechanist[D]. Beijing: Academy of Armored Force Engineering, 2007.