

变论域双模糊控制器在锂电池 均衡策略仿真中的应用

宫明辉¹, 李凌峰¹, 乌江^{1,2}, 焦朝勇³

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 西安工程大学电子信息学院, 710048, 西安;
3. 国电南瑞科技股份有限公司南瑞研究院, 710000, 西安)

摘要: 针对固定阈值均衡策略和传统模糊均衡策略在电池组充放电末期易造成过压或欠压保护误动作而不能全程均衡, 并且在电池间存在较大差异时均衡力度不足的问题, 提出变论域双模糊控制器(VDF)均衡策略。以 NCR18650B 型三元锂电池充放电实验数据建立锂电池仿真模型, 以单体锂电池的荷电状态(SOC)作为一级模糊控制器输入, 将其输出与锂电池工作电流的乘积用于调节二级模糊控制器输出论域; 以单体锂电池 SOC 与电池组平均 SOC 的差及其变化率作为二级模糊控制器输入, 其输出作为均衡电流; 以电池组内单体电池间 SOC 极差表征电池间的不一致性, 以极差首次收敛至 0.05 确定均衡时间。Simulink 仿真结果表明: VDF 均衡策略可以有效降低电压保护误动作; 与传统模糊均衡策略相比, 在恒流充放电工况和自定义动态应力测试工况下, VDF 均衡策略均衡速度可以提高 30% 以上; 在电池间存在较大差异时, 均衡结束后 VDF 均衡策略的一致性可以提高 20% 以上。

关键词: 变论域双模糊控制器; 锂电池; 荷电状态; 误动作; 极差

中图分类号: TM912 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202011019 **文章编号:** 0253-987X(2020)11-0158-08



OSID 码

Application of Variable Universe Double Fuzzy Controller in Simulation of Lithium Battery Equilibrium Strategy

GONG Minghui¹, LI Lingfeng¹, WU Jiang^{1,2}, JIAO Chaoyong³

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;
3. NARI Research Institute, NARI Technology Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: The fixed threshold equalization strategy and the traditional fuzzy equalization strategy usually result in overvoltage or undervoltage protection to malfunction at the end of the battery pack charge and discharge, and it is difficult to be fully balanced, because a large difference between the batteries makes the balance insufficient. A variable universe double fuzzy controller (VDF) equalization strategy is thus proposed. The lithium battery simulation model is established according to the experimental data of charged and discharged NCR18650B ternary lithium battery. The state of charge (SOC) of the single lithium battery is used as the input of the first-level fuzzy controller, and its output multiplied by the lithium battery working current value is used to adjust the output domain of the second-level fuzzy controller; the difference between the SOC of a single lithium battery and the average SOC of the battery pack and its rate

of change are used as the input of the second-level fuzzy controller, and its output is used as the equalizing current; the extreme difference of SOC between the single cells in the battery pack represents the inconsistency, and the equilibrium time is determined by the first convergence of the extreme difference to 0.05. The simulation results from Simulink show that the VDF equalization strategy effectively reduces the voltage protection malfunction. With constant charge and discharge current and in custom dynamic stress test (DST), VDF equalization strategy is compared with the traditional fuzzy equalization strategy, and the results show that the equalization rate increases by above 30%, and as a large difference exists between the batteries, the consistency increases by above 20% after the end of the equalization.

Keywords: variable universe double fuzzy controller; lithium battery; state of charge; malfunction; the extreme difference

锂电池具有高能量密度、高循环寿命、低自放电率和无记忆效应等诸多优点,在电动汽车储能系统中得到了广泛应用^[1-2]。由于生产工艺的限制和工作环境的差异,电池组中的单体电池之间存在不一致性。这种差异会随着充放电次数的增加而不断变大,从而严重影响电池系统的安全性和使用寿命^[3-4]。均衡管理可以均衡电池的充放电电流,有效地降低电池组内单体电池的不一致性。

目前,国内外学者主要从均衡策略和均衡拓扑两方面对电池组均衡管理进行研究。Qi 等国内外学者以电压作为电池组均衡变量^[5-6],Einhorn 等选取电池荷电状态(SOC)为均衡变量^[7],通过制定的一致性标准来评价均衡策略或均衡拓扑的有效性。但是,常规的固定阈值法(CT)在电池间差异大于预先设定的阈值后开始均衡,虽然简单但却不能根据电池差异大小来调节均衡力度,在电池差异较大时不能及时均衡,在电池差异较小时容易造成过度均衡。针对这个问题,刘征宇等采用模糊控制均衡策略,通过模糊控制阈值或 directly 对均衡对象进行模糊控制以实现快速均衡^[8-10]。但是,传统的模糊控制器(TF)中,输入输出论域及其划分均为固定值,充放电中期出现较大差异时不能提供足够的均衡力度,充放电末期出现较大差异时会因较大的均衡电流导致保护装置误动作。因此,CT 均衡策略和 TF 均衡策略只能在锂电池充放电中间的某个区间均衡,不能消除充放电末期电池间产生的差异。

针对以上问题,本文提出变论域双模糊控制器(VDF)均衡策略。在不改变输出论域划分的前提下,引入伸缩因子 α 灵活调节输出论域,在需要较大均衡电流 I_b 时自适应增大 I_b ,在充放电末期自适应减小 I_b ,以提高均衡速度并避免保护误动作,使得电池组充放电末期不一致性得到有效控制,从而进

一步提高整个电池组的能量利用率和安全性。

1 锂电池 Simulink 仿真平台建立

电动汽车动力电池均衡管理的目标是让所有的电池同时充满电、同时放完电(即保持相同充放电倍率),从而提高电池的能量利用率和安全性。常规的选择电压为均衡对象的策略只能达到工作时电池外部均衡,电池间因存在内阻和容量不同等差异性,即使外部达到均衡,内部不一致性也很难消除,所以本文选择锂电池的 SOC 为均衡对象,从锂电池差异的本质均衡,实现电池组能量利用率最大化。本文以 NCR18650B 型三元锂电池在 25℃ 恒温条件下以 0.5C(C 为电池充放电倍率)恒流充放电获得的实验数据为基础,通过参数辨识确定锂电池仿真模型参数。因传统的安时积分法在估算锂电池 SOC 时存在累计误差,所以本文采用扩展卡尔曼滤波器(EKF)估算锂电池的 SOC(用符号 β_{soc} 表示)^[11-12],以此来更精确地模拟锂电池的工作过程。

1.1 锂电池等效物理模型建立

为提高模型的估算精度,选择二阶 RC 电路模型作为锂电池的等效物理模型^[13],其模型结构如图 1 所示。图中, R_o 表示锂电池的欧姆内阻, R_s 、 R_l 分别表示锂电池浓度差极化电阻和电化学反应极化电阻, C_s 、 C_l 分别表示锂电池浓度差极化电容和电化学反应极化电容, I 表示电池的工作电流(以充电方向为正), U_{oc} 、 U 分别表示锂电池的开路电压和端电压。因锂

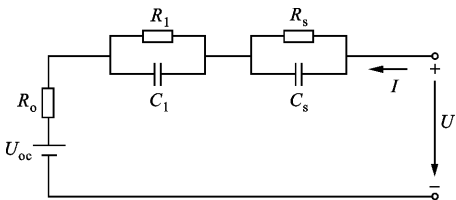


图 1 锂电池等效电路

电池 U_{oc} 和 β_{soc} 具有稳定的一一对应关系,结合图 1 等效电路模型可得

$$U=U_{oc}+IR_o+IR_l(1-e^{-t/R_lC_l})+IR_s(1-e^{-t/R_sC_s})$$

(1)

$$U_{oc}=f(\beta_{soc})$$

(2)

选择容量为 $3.132\text{ A}\cdot\text{h}$ 的锂电池做参数辨识,采用 5% 电池荷电状态下的锂电池进行间歇式充放电实验,在离线状态下获得每个阶段的 U_{oc} 和 β_{soc} ,经过多项式拟合得到两者的函数关系。同时,在每个阶段采用双指数拟合求得 R_o 、 R_s 、 R_l 、 C_s 、 C_l ,从而可以通过采集 U 和 I 再结合 EKF 算法对其他容量电池进行在线 SOC 估算。

1.2 锂电池仿真平台建立

在 Matlab/Simulink 环境下搭建锂电池的仿真模型。给锂电池模型的工作电流和端电压加入一定的噪声,以此来模拟实际的电池工作电压和电流的测量过程,并将其传递给 EKF 进行 SOC 估算,整个锂电池的仿真平台如图 2 所示。

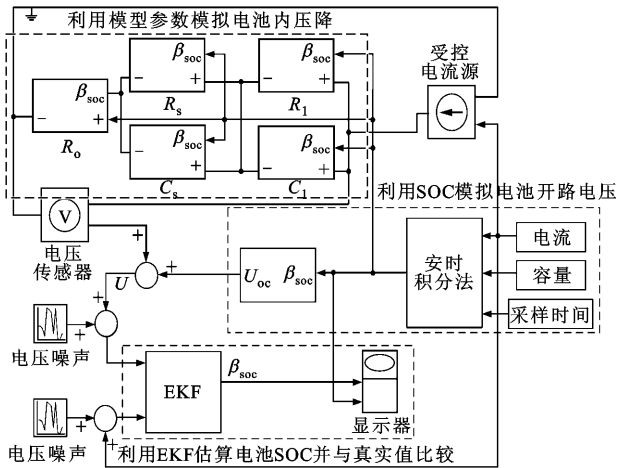


图2 锂电池仿真平台

以 1.5 A 电流进行恒流充放电和自定义动态应力测试 (DST) 工况仿真,电池的容量为 $3.089\text{ A}\cdot\text{h}$,恒流放电锂电池 β_{soc} 初始值设为 0.8 和 0.6 ,恒流充电锂电池 β_{soc} 初始值设为 0.6 和 0.4 ,DST 工况锂电池 β_{soc} 初始值设为 0.8 和 0.4 。6 种充放电条件下,EKF 估算的 β_{soc} 平均误差和最大误差如表 1 所示。锂电池 β_{soc} 初始值为 0.8 的恒流放电条件下,锂电池 β_{soc} 的真值与 EKF 估算值对比如图 3 所示。

由图 3 和表 1 可知,本文建立的锂电池仿真平台估算平均误差在 0.7% 以内,最大误差在 1% 以内。根据文献[14]可知,估算最大误差在 2% 左右即可满足工程精度。因此,本文建立的锂电池仿真平台可以很好地模拟锂电池真实的充放电过程。

表 1 EKF 估算的 β_{soc} 平均误差和最大误差

工作条件	初始 β_{soc}	β_{soc} 平均误差	β_{soc} 最大误差
恒流放电	0.8	0.002 9	0.004 8
	0.6	0.006 5	0.009 9
恒流充电	0.6	0.002 4	0.009 3
	0.4	0.001 1	0.002 5
DST 工况	0.8	0.001 9	0.004 2
	0.4	0.001 6	0.004 8

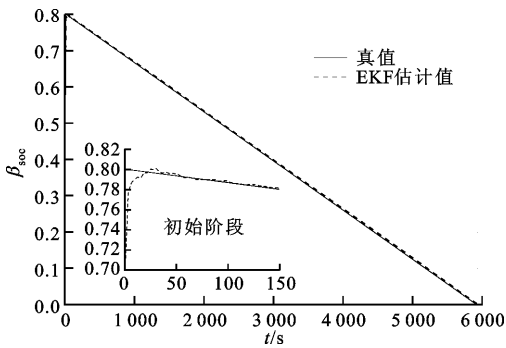


图 3 锂电池模型精度检验

2 变论域双模糊控制器设计

2.1 二级模糊控制器设计

模糊控制器主要由模糊化、数据库、规则库、推理机和去模糊化共 5 部分组成^[15-16],原理见图 4。

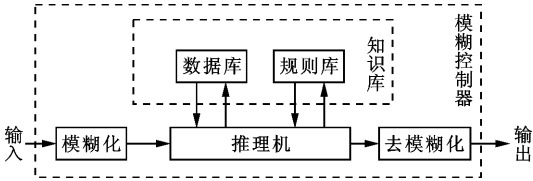


图 4 模糊控制器原理

引入伸缩因子 a ,在不改变论域划分的前提下,通过自适应调节 a ,等比例改变模糊控制器的输出论域,实现输出幅值可调节。采用 Mamdani 推理机制和重心法去模糊化^[17-18],按照模糊控制原理手动搭建变论域模糊控制器(二级模糊控制器),以单体锂电池 SOC 与电池组平均 SOC 的差值(e)及其变化率(d_e)为输入变量,均衡电流为输出变量,采用等腰三角形隶属函数。 e 的论域为 $[-0.15, 0.15]$,划分为 7 个等级:NB 表示负大,NM 表示负中,NL 表示负小,Z 表示零,PL 表示正小,PM 表示正中,PB 表示正大,如表 2 所示。 d_e 的论域为 $[-0.02, 0.02]$,划分为 5 个等级,如表 3 所示。均衡电流 I_b 的论域为 $[-1.5a, 1.5a]$,划分为 7 个等级,如表 4 所示。

当 e 在区间 PB 内时,说明该电池当前 SOC 明

表 2 e 论域的划分

等级	NB	NM	NL	Z	PL	PM	PB
论域	$[-0.15,-0.06]$	$[-0.08,-0.04]$	$[-0.06,-0.02]$	$[-0.04,0.04]$	$[0.02,0.06]$	$[0.04,0.08]$	$[0.06,0.15]$

表 3 d_e 论域的划分

等级	NB	NL	Z	PL	PB
论域	$[-0.02,-0.01]$	$[-0.014,0]$	$[-0.002,0.002]$	$[0,0.014]$	$[0.01,0.02]$

表 4 I_b 论域的划分

等级	NB	NM	NL	Z	PL	PM	PB
论域	$[-1.5a,-0.5a]$	$[-0.9a,-0.13a]$	$[-0.26a,0]$	$[-0.017a,0.017a]$	$[0,0.26a]$	$[0.13a,0.6a]$	$[0.5a,1.5a]$

显高于电池组平均 SOC。此时,若 d_e 处在 NB 区间内,说明该电池 SOC 正在快速向电池组平均 SOC 靠近,均衡电流 I_b 只需要在 PM 区间内即可。当 d_e 处在其他区间内时,为了快速均衡,需要提供较大的均衡电流 I_b ,此时均衡电流处在 PB 区间内。二级模糊控制器所有模糊控制规则如表 5 所示。

表 5 二级模糊控制器规则表

e	I_b				
	$d_e \in \text{NB}$	$d_e \in \text{NL}$	$d_e \in \text{Z}$	$d_e \in \text{PL}$	$d_e \in \text{PB}$
NB	NB	NB	NB	NB	NM
NM	NB	NM	NM	NM	NL
NL	NM	NL	NL	NL	Z
Z	NM	Z	Z	Z	PL
PL	Z	PL	PL	PL	PM
PM	PL	PM	PM	PM	PB
PB	PM	PB	PB	PB	PB

表 5 根据模糊输入变量的论域划分,制定了 35 条控制规则。用 A_n 、 B_n 和 C_n 分别表示第 n 条控制规则中输入变量 e 、 d_e 和输出变量 I_b 的模糊值, $n=1,2,3,\cdots,35$ 。模糊控制器的运行过程如下^[19]。

(1)模糊化。根据输入变量论域的划分,分别计算 e 和 d_e 的输入隶属度 $\mu_{A_n}(e)$ 、 $\mu_{B_n}(d_e)$ 。

(2)规则匹配。根据逻辑规则计算规则前件的匹配度 ω_n ,即

$$\omega_n = \min\{\mu_{A_n}(e), \mu_{B_n}(d_e)\}$$

(3)

(3)模糊推理。根据集合运算符和规则条 $\mu_{C_n}(I_b)$,计算出相应的模糊结论,即

$$\mu_{C_n}^0(I_b) = \omega_n \mu_{C_n}(I_b)$$

(4)

(4)结论合成。对所有规则条的模糊结论进行累加,生成总的后件 $\mu_{C_n}(I_b)$,即

$$\mu_{C_n}(I_b) = \sum_{n=1}^{35} \mu_{C_n}^0(I_b)$$

(5)

(5)去模糊化。采用重心法去模糊化,得输出的均衡电流 I_b ,即

$$I_b = \frac{\int I_b \mu_C(I_b) dI_b}{\int \mu_C(I_b) dI_b} = \frac{a \sum_{n=1}^{35} d_n \int \mu_{C_n}^0(I_b) dI_b}{\sum_{n=1}^{35} \int \mu_{C_n}^0(I_b) dI_b}$$

(6)

式中 d_n 是在 $a=1$ 时 $\mu_{C_n}^0(I_b) dI_b$ 的重心。当 a 取定值时,二级模糊控制器变为普通两输入单输出模糊控制器。令 $a=2$,其输入输出曲面如图 5 所示。

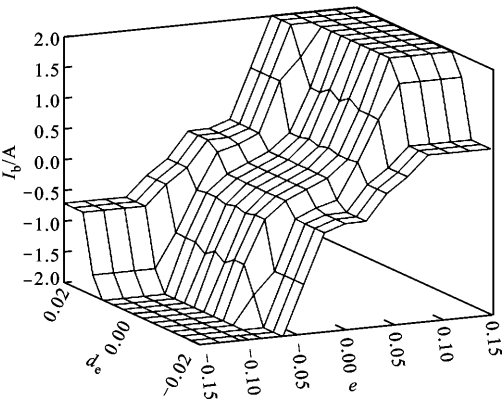


图 5 二级模糊控制器输入输出曲面

由图 5 可知,当 $a=2$ 时均衡电流 I_b 为 2 A,并且 I_b 会随着 e 和 d_e 的增大而输出较大均衡电流,从而满足快速均衡所需电流。

2.2 一级模糊控制器设计

一级模糊控制器以单体电池的 β_{soc} 为输入,其输出 g 与工作电流的乘积为调节二级模糊控制器的幅值 a 。 β_{soc} 的论域为 $[0,1]$,分为 5 个等级(VL 为很小,L 为小,M 为中,B 为大,VB 为很大),见表 6。 g 的论域为 $[0,4.5]$,分为 3 个等级,见表 7。

表 6 β_{soc} 论域的划分

等级	VL	L	M	B	VB
论域	$[0,0.1]$	$[0.05,0.25]$	$[0.2,0.8]$	$[0.75,0.95]$	$[0.9,1]$

表 7 g 论域的划分

等级	L	M	B
论域	$[0,0.4]$	$[0.2,0.8]$	$[0.5,4.5]$

当 β_{soc} 处于VL和VB区间内,说明此时电池SOC过低或者过高,为防止均衡电流过大导致的欠压和过压保护误动作,需要降低均衡电流,此时一级模糊控制器的输出 g 处在L区间内。一级模糊控制器所有控制规则如表8所示,输入输出如图6所示。

表 8 一级模糊控制器规则表

β_{soc} 等级	VL	L	M	B	VB
g	L	M	B	M	L

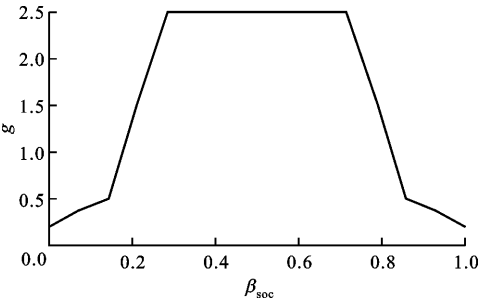


图 6 一级模糊控制器的输入和输出

VDF均衡策略的结构如图7所示。将仿真平台估算的SOC作为锂电池SOC真实值和一级模糊控制器的输入变量。在单体电池 β_{soc} 处于0.2~0.8且不一致性较大时,该策略能通过增大输出论域及时提供较大的均衡电流,进一步提高均衡速率;在单体电池 β_{soc} 处于0~0.2或0.8~1,且不一致性较大时,该策略能通过自适应缩小输出论域提供较合理的均衡电流,避免充放电末期均衡装置工作时导致的保护误动作,提高均衡管理的安全性。

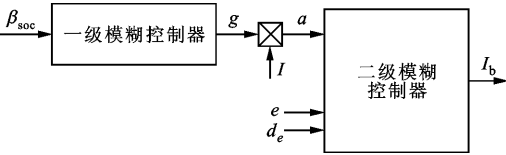


图 7 VDF均衡策略结构

3 仿真实验验证

3.1 锂电池充电末期均衡仿真

以两节串联电池充电均衡为例,系统过压保护启动阈值取为4.3 V,比较CT、TF、VDF这3种均衡策略在充电末期(β_{soc} 介于0.8~1.0)电池间存在较大不一致性时,电池端电压的变化。1号电池容

量为3.159 A·h,初始 β_{soc} 设为0.85;2号电池容量为3.095 A·h,初始 β_{soc} 设为0.95。恒流充电电流设为1.5 A。当电池充电 β_{soc} 达到0.9时,进入恒压充电模式。1号电池端电压的变化过程见图8。

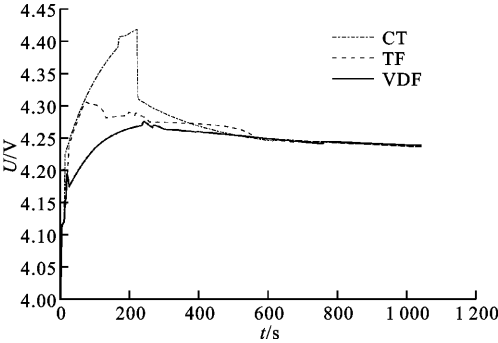


图 8 均衡充电过程中1号电池端电压的对比

由图8可知,在运行开始阶段,由于两电池的不一致性较大,CT和TF均衡方式会因产生较大的均衡电流而使得1号电池的端电压明显增加,而VDF由于测定的 β_{soc} 较大而自适应地减小均衡电流,使得1号电池的端电压增加较缓慢,从而说明VDF相比于CT和TF均衡策略能有效地避免保护误动作。

3.2 锂电池恒流工况均衡仿真

以4节电池串联形式搭建仿真平台,通过恒流放电1、2和恒流充电1、2共4种工作条件下TF和VDF均衡效果的对比,验证VDF算法的有效性,充放电电流均设置为1.5 A。以4节电池SOC极差(γ_{soc})收敛至0.05确定收敛时间,4种恒流充放电工作条件设置如下。

恒流放电1:1号电池容量为3.159 A·h,初始 β_{soc} 为0.8;2号电池容量为3.095 A·h,初始 β_{soc} 为0.7;3号电池容量为3.089 A·h,初始 β_{soc} 为0.6;4号电池容量为2.971 A·h,初始 β_{soc} 为0.5。

恒流放电2:1号、2号、3号、4号电池容量均为3.159 A·h,初始 β_{soc} 分别为0.8、0.7、0.6、0.5。

恒流充电1:1号电池容量为3.159 A·h,初始 β_{soc} 为0.2;2号电池容量为3.095 A·h,初始 β_{soc} 为0.3;3号电池容量为3.089 A·h,初始 β_{soc} 为0.4;4号电池容量为2.971 A·h,初始 β_{soc} 为0.5。

恒流充电2:1号、2号、3号、4号电池容量均为3.159 A·h,初始 β_{soc} 分别为0.2、0.3、0.4、0.5。

因在相同 β_{soc} 初值、不同电池容量的工作条件下,均衡几乎不动作,在单次循环下研究意义不大,所以本文不做讨论。在恒流放电1条件下,TF和VDF两种均衡策略的仿真结果如图9和图10所示。4种条件下的均衡结果如表9所示。

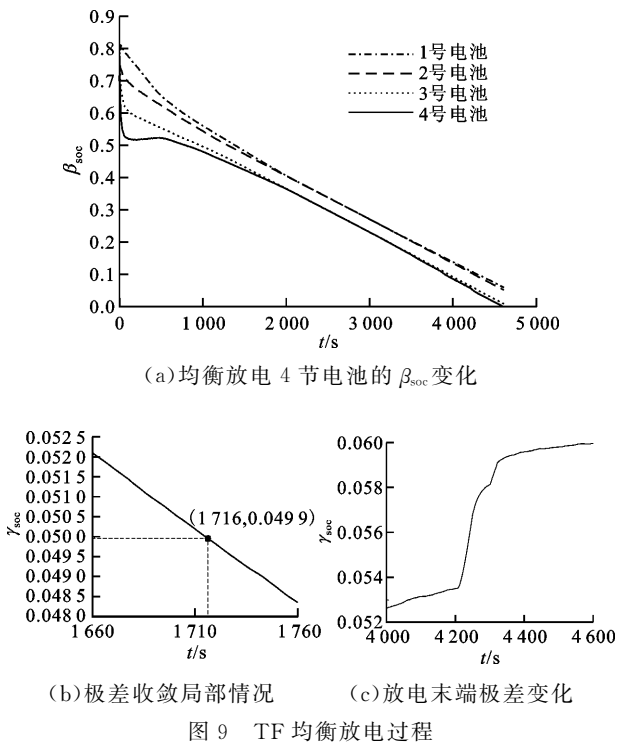


图 9 TF 均衡放电过程

由图 9 和图 10 可知:放电初期, γ_{soc} 很大,两均衡方法均输出较大的均衡电流,使得 γ_{soc} 减小,但 VDF 能自适应增加 I_b 实现快速均衡,均衡时间由 1 716 s 缩至 924 s,均衡速度提高 46%;放电末期,电池 β_{soc} 降到 0.2 以下时,TF 为防止保护误动作而停止均衡,因电池间存在差异性使得 γ_{soc} 继续扩大,而 VDF 可通过自适应减小 I_b 继续均衡,抑制 γ_{soc} 扩大,使得 γ_{soc} 由 0.059 9 减小至 0.047 9,一致性提高 20%。由表 9 可知,4 种恒流充放电条件下,VDF 均衡速度与 TF 相比均明显提升,可提高 30% 以上。恒流放电 1 和恒流充电 1 条件下,4 节电池容量存在较大差异,充放电末期 VDF 一致性提升 20%。恒流放电 2 和恒流充电 2 条件下,4 节电池容量一致,即使末期停止均衡,电池间不一致性也不会明显

表 9 恒流充放电工况下的均衡仿真结果

工作条件	策略	收敛时间/s	结尾极差
恒流放电 1	TF	1 716	0.059 9
	VDF	924	0.047 9
恒流放电 2	TF	1 686	0.044 5
	VDF	927	0.041 3
恒流充电 1	TF	2 625	0.054 2
	VDF	1 764	0.043 2
恒流充电 2	TF	2 553	0.041 2
	VDF	1 740	0.038 3

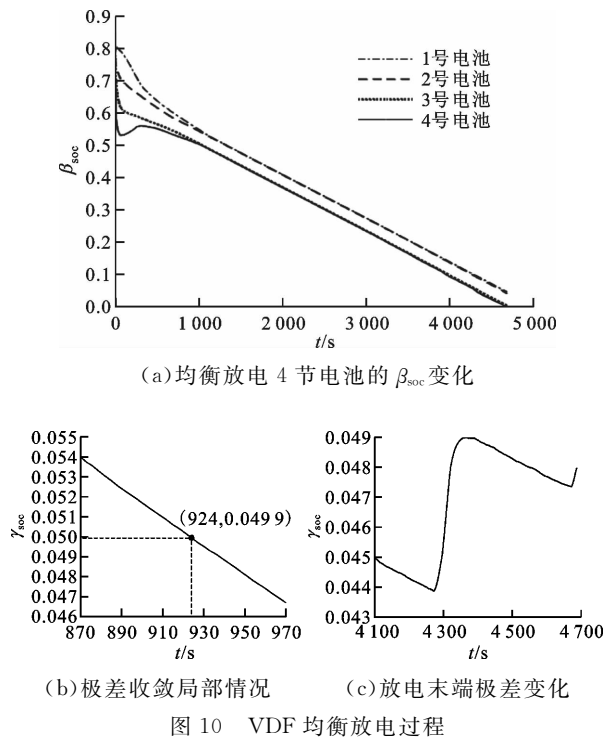


图 10 VDF 均衡放电过程

扩大,因此两种均衡方式在充放电末期时电池的极差没有明显变化。仿真结果说明,VDF 与 TF 相比,能在电池间存在较大不一致性时实现快速均衡,在充放电末期可以有效抑制不一致性扩大。

3.3 锂电池自定义动态应力测试工况均衡仿真

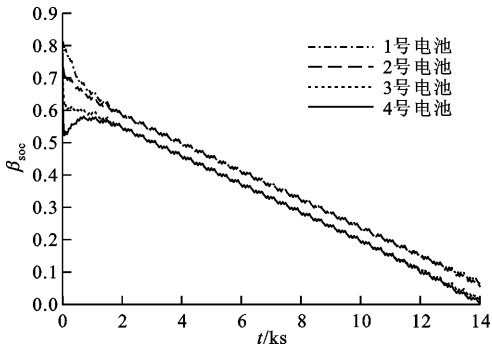
以 4 节电池串联形式搭建仿真平台,通过自定义 DST 工况 1、2 这两种工作条件下 TF 和 VDF 均衡效果的对比,验证 VDF 算法的有效性。以 4 节电池 SOC 极差收敛至 0.05 确定收敛时间,两种 DST 工况初始条件设置如下。

DST 工况 1:1 号电池容量为 3.159 A·h,初始 β_{soc} 为 0.8;2 号电池容量为 3.095 A·h,初始 β_{soc} 为 0.7;3 号电池容量为 3.089 A·h,初始 β_{soc} 为 0.6;4 号电池容量为 2.971 A·h,初始 β_{soc} 为 0.5。

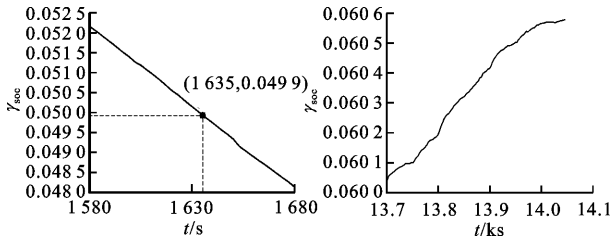
DST 工况 2:1 号、2 号、3 号、4 号电池容量均为 3.159,初始 β_{soc} 分别为 0.8、0.7、0.6、0.5。

DST 工况 1 条件下 TF 和 VDF 两种均衡策略的仿真结果如图 11 和 12 所示。两种条件下的均衡结果如表 10 所示。

由图 11 和图 12 可知:DST 工况 1 条件下,VDF 与 TF 策略相比,均衡时间由 1 635 s 缩短至 927 s,均衡速度提高了 43%;在 DST 工况末期, γ_{soc} 由 0.060 6 减小至 0.042 8,一致性提高 29%。由表 10 可知,在两种自定义 DST 工况下,VDF 均衡速度与 TF 相比均有了明显提升,可提高 43% 以上。

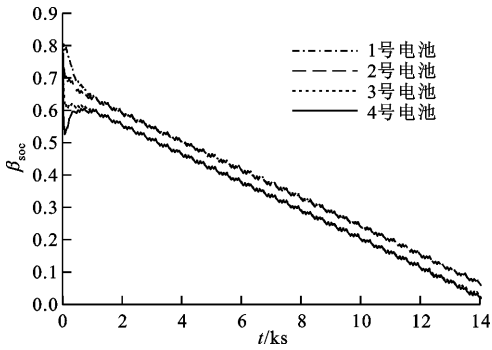


(a)DST 工况 1 下 4 节电池的 β_{soc} 变化

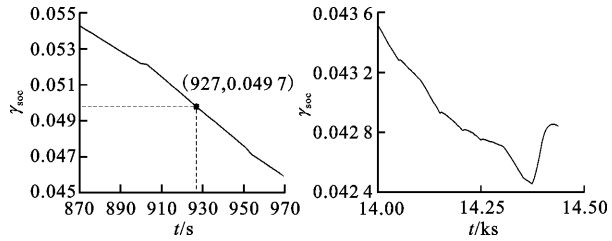


(b)极差收敛局部情况 (c)放电末端极差变化

图 11 TF 在 DST 工况 1 下的均衡放电过程



(a)DST 工况 1 下 4 节电池的 β_{soc} 变化



(b)极差收敛局部情况 (c)放电末端极差变化

图 12 VDF 在 DST 工况 1 下的均衡放电过程

DST 工况 1 下 4 节电池容量存在较大差异,在充放电末期 VDF 策略的一致性可提升 29%。DST 工况 2 下 4 节电池容量一致,在充放电末期时电池的极差没有明显变化。仿真结果说明,VDF 与 TF 相比,能够在电池间存在较大不一致性时实现快速均衡,在充放电末期可以有效抑制不一致性扩大。

表 10 DST 工况下的均衡仿真结果

工作条件	策略	收敛时间/s	结尾极差
DST 工况 1	TF	1 635	0.060 6
	VDF	927	0.042 8
DST 工况 2	TF	1 668	0.044 2
	VDF	936	0.041 7

4 结 论

为提高锂电池组充放电过程中的均衡速度和充放电末期时电池间的一致性,本文提出 VDF 均衡策略,通过在模糊控制器输出论域中引入伸缩因子 α ,自适应调节均衡电流 I_b 。利用 NCR 18650B 型三元锂电池充放电实验数据建立仿真模型,将 EKF 估算的锂电池 SOC 作为均衡变量,通过恒流充放电工况和自定义 DST 工况仿真实验,得出结论如下。

(1)VDF 均衡策略在充放电末期可以通过减小 I_b 而避免保护误动作,从而实现全程均衡。与传统模糊均衡策略相比,在电池间存在较大差异时,均衡结束后电池间的一致性可提高 20% 以上。

(2)VDF 均衡策略在充放电初期可以通过增大 I_b ,从而实现快速均衡。与传统模糊均衡策略相比,均衡速度可提高 30% 以上。

本文提出的 VDF 均衡策略与传统均衡策略相比,在锂电池均衡充放电应用中更具有实用性,可为今后锂电池均衡管理研究提供参考。

参考文献:

[1] 杨俊,张希,高一钊. 锂电池电化学传递函数模型建模及参数辨识 [J]. 电源技术, 2019, 43(7): 1132-1135.
YANG Jun, ZHANG Xi, GAO Yizhao. Modeling and parameter identification of electrochemical transfer function model for lithium battery [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(7): 1132-1135.

[2] WANG Peiyao, ZHAO Bangchuan, BAI Jin, et al. Rationally designed three-dimensional porous NiCo₂N@C reticular structure for high-performance Li-ion batteries [J]. Scripta Materialia, 2020, 186: 104-108.

[3] 续丹,毛景禄,王斌,等. 分布式电池电源模块储能系统的荷电状态均衡控制 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(10): 79-85.
XU Dan, MAO Jinglu, WANG Bin, et al. A balance control scheme of SOC for power module energy storage systems with distributed batteries [J]. Journal of

- Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(10): 79-85.
- [4] 刘倩怡, 徐顺刚, 许建平, 等. 一种基于推挽变换器的模块化电池均衡电路 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3213-3221.
- LIU Qianyi, XU Shungang, XU Jianping, et al. A modularized equalizer for series-connected batteries based on push-pull converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3213-3221.
- [5] QI Guoguang, LI Xiangjun, YANG Daiming. A control strategy for dynamic balancing of lithium iron phosphate battery based on the performance of cell voltage [C] // Proceedings of the 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [6] YARLAGADDA S, HARTLEY T T, HUSAIN I. A battery management system using an active charge equalization technique based on a DC/DC converter topology [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(6): 2720-2729.
- [7] EINHORN M, ROESSLER W, FLEIG J. Improved performance of serially connected Li-ion batteries with active cell balancing in electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(6): 2448-2457.
- [8] 刘征宇, 马亚东, 孙庆, 等. 基于动态模糊阈值的电池组均衡策略优化 [J]. 中国机械工程, 2017, 28(5): 624-629.
- LIU Zhengyu, MA Yadong, SUN Qing, et al. Optimization of battery equalization strategies based on dynamic fuzzy threshold [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(5): 624-629.
- [9] 滕力, 李媛媛, 陈少棠, 等. 基于能量转换策略的锂电池组均衡技术研究 [J]. 电源技术, 2020, 44(1): 45-47.
- TENG Li, LI Yuanyuan, CHEN Shaotang, et al. Research on lithium battery pack equalization technology based on energy conversion strategy [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(1): 45-47.
- [10] 秦嘉琦, 冉峰, 徐浩, 等. 一种基于模糊控制的锂电池均衡系统的研究 [J]. 工业控制计算机, 2016, 29(7): 32-33.
- QIN Jiaqi, RAN Feng, XU Hao, et al. A research on lithium battery balance system with fuzzy control [J]. Industrial Control Computer, 2016, 29(7): 32-33.
- [11] MEYER L, ICHALAL D, VIGNERON V. An unknown input extended Kalman filter for nonlinear stochastic systems [J]. European Journal of Control, 2020
- [12] 赵希梅, 武文斌, 朱国昕. 基于扩展卡尔曼滤波器的高速永磁直线同步电机扰动前馈补偿 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(7): 1516-1522.
- ZHAO Ximei, WU Wenbin, ZHU Guoxin. Disturbance feed-forward compensation for high-speed permanent magnet linear synchronous motor based on extended Kalman filter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(7): 1516-1522.
- [13] 张振宇, 汪光森, 聂世雄, 等. 脉冲大倍率放电条件下磷酸铁锂电池荷电状态估计 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1769-1779.
- ZHANG Zhenyu, WANG Guangsen, NIE Shixiong, et al. State of charge estimation of LiFePO₄ battery under the condition of high rate pulsed discharge [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1769-1779.
- [14] 张志勇, 张刘铸, 黄彩霞, 等. 锂离子电池组模型参数的辨识 [J]. 电池, 2019, 49(1): 25-27.
- ZHANG Zhiyong, ZHANG Liuzhu, HUANG Caixia, et al. Identification of model parameter for Li-ion battery pack [J]. Battery Bimonthly, 2019, 49(1): 25-27.
- [15] PIROOZ M, FATEH M M. Impedance fuzzy control of an active aircraft landing gear system [J]. International Journal of Dynamics and Control, 2019, 7(4): 1392-1403.
- [16] 温正, 孙华克. MATLAB 智能算法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 198-200.
- [17] 曾珂, 徐文立, 张乃尧. 特定 Mamdani 模糊系统的通用逼近性 [J]. 控制与决策, 2000, 15(4): 435-438.
- ZENG Ke, XU Wenli, ZHANG Naiyao. Universal approximation of special Mamdani fuzzy systems [J]. Control and Decision, 2000, 15(4): 435-438.
- [18] GAO Hongliang, ZHAN Xisheng, YUAN Yiran, et al. Mitigation of low frequency oscillations in power systems based on Mamdani fuzzy inference [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2019, 41(12): 3477-3489.
- [19] 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. Fuzzy control strategy for battery equalization charge based on state of charge [J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(2): 113-120.

(编辑 陶晴 亢列梅)