电池组分段混合均衡控制策略

张 娥,徐 成,王康丽,蒋 凯

(华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要:为了解决电池组由于制造工艺和应用环境的差异所引起的不一致性问题,针对具有电压平台宽、在充放电末端电压变化快这类特性的电池体系,提出了一种基于电压和荷电状态(SOC)的分段混合均衡控制策略。应用MATLAB/Simulink仿真平台,搭建基于双向反激式变压器的多绕组结构的主动均衡拓扑结构,并分别在几种不同的电池组运行工况下验证所提分段混合均衡控制策略的有效性。与采用单一均衡变量的均衡控制策略进行比较,仿真结果表明分段混合均衡控制策略在电池组充电完成或放电结束后能够同时保持电池组电压和SOC良好的均衡效果;所提分段混合均衡控制策略能够更有效地提高电池组的一致性。 关键词:电池组;不一致性;均衡;拓扑结构;混合控制策略

中图分类号:TM 911 文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202002014

0 引言

大规模储能技术是构建可再生能源高渗透率电 网、促进能源转型的关键支撑技术[1-2]。在众多的储 能技术中,储能电池由于具有配置灵活、响应速度 快、维护成本低等特点,在电网调峰/调频、分布式 发电、电动汽车等领域具有广阔的应用前景[3-4],是 储能技术研发和应用较为活跃的领域^[5]。近年来, 国家相关政策的出台以及资金的扶持极大促进了储 能电池技术的发展,未来储能电池的性能有望大幅 度提高,将进一步推动其大规模应用。在实际的储 能应用中需要将大量的单体电池串并联成组使用, 以达到大容量储能系统的电压和容量要求[6-7]。然 而,由于制造工艺和使用环境的差异,单体电池的容 量、内阻、自放电率以及温度等参数会存在不一致 性,且不一致性将会随着电池服役时间的增长而逐 渐恶化,从而显著降低电池组的有效容量和缩短电 池组的循环寿命,严重制约电池组的整体性能^[8-9]。 因此,在实际应用中需要对电池组进行均衡控制,降 低成组单体电池间的不均衡程度,以削弱单体电池 间的不均衡所带来的影响,优化电池组性能以及延 长其使用寿命,保证电池组安全、高效运行。

目前,国内外众多学者已经对电池组均衡控制 进行了大量的研究。文献[10]介绍了多种均衡拓扑 的工作原理,并从拓扑结构的复杂性、均衡速度、均 衡效率以及系统成本等方面,分析了其优缺点,为根

收稿日期:2019-08-27;修回日期:2019-12-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0905600);国家 自然科学基金资助项目(51622703,U1766216)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFB0905600) and the National Natural Science Foundation of China (51622703, U176-6216) 据实际应用场合需求选择合适的均衡拓扑结构提供 了合理的依据。文献[11]针对锂离子电池组容量不 一致性的问题,提出了一种以热力学荷电状态t-SOC (thermodynamic-Stage Of Charge)作为均衡判断依 据以及以动力学荷电状态k-SOC(kinetic-Stage Of Charge)作为均衡控制依据的均衡控制策略,但需要 在均衡过程中实时计算每一节单体电池累计的均衡 安时,计算量相对较大且计算精度要求高。文献 [12]在采用以荷电状态(SOC)作为均衡变量的基础 上,引进模糊逻辑控制算法,经卡尔曼滤波方法估计 得到电池 SOC,其均衡结果依赖于电池 SOC 估计的精 确性。文献[13]针对磷酸铁锂电池提出一种考虑温 度影响的SOC估计方法及电池均衡模型,由实验结 果可看出:当电池处于电压平台期时,虽然电池组的 电压一致性很高,但其SOC离散度仍相对较大,采用 基于平均电压的被动均衡方法的均衡效果不是很理 想。文献[14]提出一种多变量均衡控制策略,从仿 真结果可看出,多变量均衡控制下的电池组老化速 率和温度的一致性比SOC均衡控制策略更高,但电 池组SOC的均衡效果则远差于SOC均衡控制策略。

综上所述,在目前已有的均衡策略中,多变量均 衡策略虽然考虑到电池温度、老化速率等参数的均 衡问题,但制约了SOC变量一致性的进一步提高。 目前大多数均衡方案均采用单变量均衡策略,其均 衡拓扑结构、控制策略相对简单,容易实现,但仅能 针对单一变量(如SOC、单体电压等)进行均衡控制。

针对具有电压平台宽且在充放电始末端电压变 化快特点的电池体系,如磷酸铁锂电池^[15]、液态金属 电池^[16],本文提出一种基于双向反激式变压器的分 段混合均衡控制策略。分段混合控制策略具体是指 将电池组的整个充电或放电过程分为始末段和中间 段,分段分别选取均衡变量进行均衡控制。其中始 末段选取电池电压作为均衡变量,中间段选取电池 SOC作为均衡变量。基于双向反激式多绕组变压器的均衡电路具有结构简单、开关管数量少、易于控制等特点;分段混合均衡策略能够在电池充电完成或放电结束时同时实现电池SOC和电压的均衡,可以更有效地提高电池组的一致性,避免电池组出现过充或过放现象,保证电池组安全、高效运行。

1 均衡电路拓扑结构及其工作原理

1.1 均衡电路拓扑结构

基于双向反激式变压器多绕组结构的均衡电路 见图1,其由开关管、整流二极管、电容、变压器以及 n个单体电池构成。开关管选用功率场效应晶体管 (MOSFET),并采用脉宽调制(PWM)控制方式;整流 二极管选用肖特基二极管,其开关频率高且正向压 降小,正常导通压降约为0.6 V;变压器为多绕组结 构,有1个原边绕组、n-1个副边绕组,每一个绕组对 应一个单体电池,变压器起着隔离、储能的作用。在 均衡过程中,将SOC最高或电压最高的单体电池接 入变压器原边,其余单体电池接入变压器副边,通过 控制开关管的有序导通与关断,实现电池组均衡。



图1 均衡电路的拓扑结构

Fig.1 Topological structure of equalization circuit

变压器工作时需遵循磁通复位原则,否则变压器会出现磁通饱和问题,造成开关管损害。磁通复位是指在一个周期内,变压器在开关管导通期间增加的磁通量应等于开关管关断期间减少的磁通量。

在开关管的一个周期内,变压器磁通量的变化 量 $\Delta \phi$ 可以表示为:

$$\Delta \Phi = \begin{cases} (U_{i}/N_{p})t & t \in [0, DT_{n}] \\ \frac{U_{i}}{N_{p}}DT_{n} - \frac{U_{o} + 0.6}{N_{s}} (t - DT_{n}) & t \in (DT_{n}, T_{cr}] \\ 0 & t \in (T_{cr}, T_{n}] \end{cases}$$
(1)

其中, N_{p} 、 N_{s} 分别为变压器原边、副边绕组的匝数,且 有 N_{p} : N_{s} =1; U_{i} 、 U_{o} 分别为变压器的输入、输出电压; T_{cr} 为磁通量等于0的时刻; T_{n} 为开关周期;D为占空 比。当 T_{cr} = T_{n} 时,将t= T_{n} 代入式(1)的第二个子式 中可得:

$$\frac{U_{\rm i}}{N_{\rm p}} DT_{\rm n} - \frac{U_{\rm o} + 0.6}{N_{\rm s}} (T_{\rm n} - DT_{\rm n}) \le 0$$
 (2)

因此,占空比可以表示为:

$$D \le \frac{1}{1 + U_{i}/(U_{o} + 0.6)}$$
(3)

一旦确定变压器的输入电压和输出电压,则占 空比可根据式(3)得到。

1.2 均衡电路工作原理

在电池组处于充电、放电和静置的过程中,电池 组配备的均衡电路能够保证各单体电池的SOC或者 电压趋于一致,从而避免个别单体电池因过充、过放 导致其提前老化,影响电池组的正常使用。

将电池组中能量最高的单体电池接入变压器的 原边,其余单体电池接入变压器的副边。在原边开 关管Q,导通期间,原边绕组储能;当原边开关管关 断时,原边绕组中的能量传递给副边绕组,在该期间 副边绕组经整流二极管续流,给其余单体电池充电。

该均衡电路在均衡过程中可有针对性地将易过 充单体的多余能量进行转移,维持各单体电池电量 的基本均衡,从而避免单体电池的过充/过放现象。

2 均衡控制策略

2.1 均衡变量的选择

在设计电池组的均衡策略时,均衡变量的选择 会直接影响均衡效果。目前常见的均衡变量有电池 端电压以及电池SOC^[17]。电池电压可直接测量,将 其作为均衡变量容易实现,但由于电池电压是电池 的外特性参数,并不能完全表征电池的整体性能。 电池SOC能够表征电池的整体性能,SOC均衡最根 本的目的是平衡电池间的剩余电量及SOC的差异, 直接以SOC作为均衡变量是比较理想的均衡方式。 然而,电池SOC需要根据电压、电流以及温度等电池 参数近似估计得到,以电池SOC作为控制变量的均 衡策略需要依赖精确可靠的SOC估计^[18]。

本文针对的均衡对象是磷酸铁锂电池、液态金 属电池等具有电压平台宽且在充放电末端电压变化 快特性的电池体系。对于这类电池体系而言,其电 压-SOC曲线有明显的电压平台期,在电压平台期电 压的一致性并不能代表电池 SOC 达到一致性,即当 电池组各单体电池的电压差异不大时,SOC差异甚 至可能达到50%以上,显然此时以SOC作为评价电 池组一致性的标准更为合理,另外在电压平台期电 压比较稳定,有利于得到更为精确的SOC估计值。 电池在充放电末端电压变化快,即使单体电池间 SOC差异很小,单体电池的电压差异也非常明显,在 这一阶段以电池电压作为均衡控制变量更有利于提 高电池组的一致性。考虑上述因素,本文提出了基 于电池电压和SOC的分段混合均衡控制策略,即在 电池充放电始末端以电池电压作为均衡控制变量, 在电池处于电压平台期时以电池 SOC 作为均衡控制

变量的控制策略。

2.2 电池组均衡控制策略

首先,根据电池组中各单体电池 SOC 的分布情况判断电池组是处于充放电始末段还是处于中间段,从而选择合理的均衡控制变量;然后,根据设定阈值选择合适的均衡控制对象;最后,设置 SOC 最高(电压最高)的单体电池通过均衡电路放电,SOC 较低(电压较低)的单体电池通过均衡电路充电,从而实现电池组均衡。电池组均衡控制的流程见图2。



图2 分段混合均衡控制流程

Fig.2 Flowchart of segmented hybrid equalization control strategy

利用MATLAB/Simulink中的电池模型可以直接采集各节单体电池的电压U_i和SOC_i,并对各单体电池SOC进行排序。

若式(4)和式(5)所示的不等式同时成立,则以 电池 SOC 作为均衡控制变量进行均衡,否则以电池 电压作为均衡控制变量进行均衡。

$$\alpha_1 \leq \text{SOC}_{\min} \leq \alpha_2 \tag{4}$$

$$\alpha_1 \leq \text{SOC}_{\text{max}} \leq \alpha_2 \tag{5}$$

其中, α_1 、 α_2 分别为电池电压平台期始、末两端所对应的SOC值,且有 $\alpha_1 < \alpha_2$ 。

2.2.1 电池SOC均衡

均衡开始之前,根据采集得到的各单体电池的 SOC判断式(4)和式(5)所示的不等式是否同时成 立,若同时成立,则系统选择以电池SOC作为均衡控 制变量。SOC均衡的具体过程如下。

首先判断式(6)是否成立,如果成立,则认为电 池组需要进行均衡,满足主动均衡开启条件,均衡控 制模块生成驱动信号控制变压器原、副边相应开关 管的开断,进行能量转移,同时进行离散度 ε 的计 算。SOC离散度 ε 的计算公式见式(7)。

$$\frac{\text{SOC}_{\text{max}} - \text{SOC}_{\text{min}} > \beta}{\sqrt{N}}$$
(6)

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (\text{SOC}_i - \overline{\text{SOC}})^2}{N - 1}}$$
(7)

其中, β 为以SOC为均衡控制变量的均衡开启阈值; SOC_{*i*}为单体电池*i*的SOC值, $1 \le i \le N \le i$ 为整数,N为单体电池数;SOC为N节单体电池的SOC平均值。

开启均衡之后,控制模块实时采集当前单体电 池的SOC以及计算离散度,直到 $\varepsilon \leq \theta(\theta \rightarrow SOC$ 均衡 结束阈值)时均衡结束。

2.2.2 电池电压均衡

均衡开始之前,根据采集得到的各单体电池的 SOC判断式(4)和式(5)所示的不等式是否同时成 立,若不同时成立,则系统选择以电池电压作为均衡 控制变量。电压均衡的具体过程如下。

首先,控制模块采集单体电池的电压信息并进行排序,得到U_{max}和U_{min}。

判断式(8)是否成立,若成立,则认为电池组需 要进行均衡,满足主动均衡开启条件,均衡控制模块 生成驱动信号控制变压器原、副边相应开关管的开 断,进行能量转移。开启均衡后控制模块仍会不断 采集单体电池的电压值,直到式(9)成立,均衡结束。

$$U_{\rm max} - U_{\rm min} > \gamma \tag{8}$$

$$U_{\max} - U_{\min} \leq \mu \tag{9}$$

其中,γ为以电压为均衡控制变量的均衡开启阈值; μ为以电压为均衡控制变量的均衡结束阈值。

3 算例分析

采用5节磷酸铁锂电池串联组成的电池组作为 实验对象,实验参数设置如下:电池的额定容量为 1.4 A·h,电池的标称电压为3.2 V,充电限制电压为 3.7 V,放电限制电压为2 V,分段阈值 α_1 =20%,分段 阈值 α_2 =80%,SOC均衡开启阈值 β =5%,SOC均衡关 闭阈值 θ =1%,电压均衡开启阈值 γ =50 mV,电压均 衡关闭阈值 μ =5 mV。所选用的变压器输入端、输 出端电压的参考取值范围为[3,4.5] V,计算得到该 条件下占空比的取值范围为 $D \le 43.75\%$,在本文的 均衡电路中将开关管的恒定占空比设定为D=43%。 利用 MATLAB/Simulink 在不同的工况下对本文采 取的均衡电路及所提分段混合均衡控制策略进行仿 真验证,并与单一均衡变量控制策略进行对比分析。 3.1 恒流充电工况

单体电池 1、4 的初始 SOC 分别设置为 30%、 22%,其值均大于分段阈值α₁,单体电池 2、3、5 的初 始 SOC 分别设置为 15%、7%、10%,其值均小于分段 阈值α₁。对串联电池组进行 0.2 C倍率恒流充电,采 用本文所提分段混合均衡控制策略对电池组进行均 衡。电池组的 SOC 均衡效果如图 3(a)所示,充电开 始时电池组的 SOC 离散度为 9.31%,充电完成后 5 个单体电池的 SOC 分别为 100%、99.99%、99.94%、 99.99%、99.99%,各单体电池的 SOC 基本一致,其离 散度接近0。由图可见,电池组SOC达到均衡所需时间为1090s,之后当电池组运行在电压平台期时, 其SOC离散度维持在1%,而进入充电末端后,经过电 压均衡,单体电池间SOC的差异进一步缩小,离散度 进一步降低。电池组的电压均衡效果如图3(b)所 示,充电完成后5个单体电池的电压分别为3.8070、 3.8068、3.8021、3.8069、3.8069V,可见充电完成后 最大电压差为4.9mV。上述结果表明本文所提均衡 控制策略实现了良好的均衡效果,电池组在充电结 束后各单体电池的电压以及SOC一致性都很高,电 池组的不一致性得到了极大的改善。





为了更进一步明确本文所提均衡控制策略的有效性,将其分别与单纯以SOC作为均衡变量的控制策略和单纯以电压作为均衡变量的控制策略进行对比分析。在所有参数设定均相同的条件下,单纯以SOC作为均衡控制变量的均衡效果如图4所示。电池组的SOC均衡效果如图4(a)所示,均衡时间为600 s,之后电池组SOC的离散度维持在1%。





strategy based on SOC

电池组内各单体电池的电压如图4(b)所示,充电完成后5个单体电池的电压分别为3.6358、3.6216、3.4814、3.6290、3.6135V,充电完成后最大电压差为154.4mV。采用单纯以SOC作为均衡变量的控制策略能够通过均衡使电池组内各单体电池的SOC一致性保持较高,但在充电末端电压会出现较大的差异。而且随着电池组在充电末端SOC的离散度越大,其电池组内单体电池的最大电压差也会越大。

本文所提均衡控制策略与单纯以SOC作为均衡 变量的控制策略相比,2种策略下电池组充电所用 时间相近,但采用本文所提分段混合均衡策略在充 电结束后电池组的SOC离散度更低,最大电压差更 小。可见,分段混合均衡控制策略能实现更好的均 衡效果,在充电结束后其单体电池电压和SOC的一 致性都较单纯以SOC作为均衡变量的控制策略好。 仿真结果表明本文所提均衡控制策略能够更有效地 提高电池组的一致性,从而提高电池组的利用率。

在所有参数设定均相同的条件下,单纯以电压 作为均衡变量的控制策略的均衡效果见图5,整个 充电过程所用时间比前述2种控制策略长。在实际 使用中,获取单体电池的电压参数时必然存在检测 误差,电压的检测精度直接影响到电池 SOC 估计的 精确性及电池组的均衡效果。在本次仿真中,给各 单体电池电压加入噪声强度为0.0001dB的白噪声 来模拟实测中的检测误差。该策略下电池组内各单 体电池的SOC见图5(a),充电开始时电池组SOC的 离散度同样为9.31%,在10667s左右时电池组SOC 离散度缩小到1%,所用时间远远多于混合均衡控 制策略。电池组的电压均衡效果见图5(b),可见电 池组采用单纯以电压作为均衡变量的控制策略时, 充电过程中5个单体电池的电压一致性高。均衡最 根本的目的是平衡电池间剩余电量及 SOC 的差异, 由图5可以看出,在电压平台期,虽然电池组内单体



电压已达到均衡,但是单体间SOC的差异仍较大。

3.2 动态压力测试工况

172

动态压力测试DST(Dynamic Stress Test)工况 是一组较典型的动态工况,其动态性很强,可以很好 地体现电池运行中的状态变化。一般采用固定的电 流曲线或者固定的功率曲线来表示DST工况,本文 采用固定的电流曲线表示DST工况。单体电池1、 3、5的初始SOC分别设置为89%、95%、81%,其值 均大于分段阈值α,,单体电池2、4的初始SOC分别 设置为73%、77%,其值均小于分段阈值α,。其余参 数设置同 3.1 节。在验证测试中,1个 DST 工况为1 个循环单位,测试过程中共完成了21个完整的DST 循环,在第22个循环结束放电。运行过程中的电 压、电流曲线如图6(a)所示。放电结束后5个单体 电池的电压分别为2.5723、2.5677、2.5724、2.5722、 2.5722 V,放电结束后最大电压差为4.7 mV。运行 过程中电池的SOC曲线见图6(b),测试前电池组的 SOC离散度为8.94%,在放电末端5个单体电池的 SOC曲线重合度很高,几乎同时放电结束,其SOC离 散度很低,趋近于0。可见,在DST工况下,采用分 段混合均衡控制策略可明显降低电池组的SOC离散 度及最大电压差,达到提高电池组一致性的目的。



图6 DST工况下的均衡结果



3.3 混合动力脉冲能力特性测试工况

混合动力脉冲能力特性(HPPC)测试能够获得 所测电池的动态特性,是电池测试常用的一组动态 测试工况。在试验中,脉冲放电电流取3C倍率,脉 冲充电电流取脉冲放电电流的0.75,即2.25C倍率, 其持续时间均为10s。以10%放电深度为间隔,对 电池施加单个HPPC测试脉冲,放电电流见图7(a)。 5节单体电池的初始SOC设置同3.2节。各均衡阈 值设置如前所述,电池组电压均衡效果如图7(a)所 示,放电结束后5个单体电池的电压分别为2.0970、 2.0921、2.0970、2.0968、2.0969V,可见放电结束后 最大电压差为4.9mV。电池组SOC的均衡效果见图 7(b)。可见,在HPPC测试工况下,采用分段混合均 衡控制也能够明显降低电池组的SOC离散度以及最 大电压差,达到提高电池组一致性的目的。



Fig.7 Equalization results under HPPC working condition

4 结论

针对磷酸铁锂电池、液态金属电池等具有电压 平台宽且在充放电末端电压变化快特性的电池体系 的均衡问题,本文提出一种基于双向反激式变压器 的电池组分段混合均衡控制策略,通过仿真实验对 该策略的有效性进行了验证,由实验结果可知,传统 的单纯以SOC作为均衡变量的控制策略无法实现电 池组的电压均衡;传统的单纯以电压作为均衡变量 的控制策略无法快速实现电池组的SOC均衡,采用 所提分段混合均衡策略既能保持电池组中单体电池 的电压基本一致,又能快速实现电池组的SOC均衡, 有效防止电池组的过充或过放现象的发生,有利于 提高电池组的利用率以及延长电池组的使用寿命。 在DST和HPPC这2种动态工况下,采用本文所提分 段混合均衡控制策略同样能实现良好的均衡效果。

需要指出的是,本文选用的是性能较为一致的 单体电池作为实验对象,通过设置不同的SOC初始 值来检验本文所提控制策略的有效性,并没有考虑 到电池老化对均衡效果的影响,在以后的研究工作 中,将会进一步考虑电池老化的影响。

参考文献:

- [1]李建林,马会萌,惠东.储能技术融合分布式可再生能源的现状及发展趋势[J].电工技术学报,2016,31(14):1-10,20.
 LI Jianlin,MA Huimeng,HUI Dong. Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(14):1-10,20.
- [2]徐国栋,程浩忠,马紫峰,等.用于缓解电网调峰压力的储能系统规划方法综述[J].电力自动化设备,2017,37(8):3-11.
 XU Guodong, CHENG Haozhong, MA Zifeng, et al. Overview of ESS planning methods for alleviating peak-shaving pres-

173

sure of grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8):3-11.

- [3] LUO X, WANG J H, DOONER M, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation[J]. Applied Energy, 2015, 137:511-536.
- [4] RAJ K A, BAG S, ROY A, et al. Battery technologies for energy storage[M]. [S.l.]:Encyclopedia of Sustainable Technologies, 2017:469-486.
- [5] 谢国辉.储能电池技术助力新一代电力系统发展[N].国家电 网报,2018-03-13(8).
- [6] 郭杰,王小鹏,孙春霞,等.动力电池串并联结构重组的均衡充 电方法[J].电力自动化设备,2019,39(5):163-168.
 GUO Jie,WANG Xiaopeng,SUN Chunxia, et al. Balanced charging method of power batteries with reconstructed series-parallel structure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5):163-168.
- [7] QI J, LU D D C. A preventive approach for solving battery imbalance issue by using a bidirectional multiple-input Cuk converter working in DCVM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10):7780-7789.
- [8] BOUCHHIMA N, SCHNIERLE M, SCHULTE S, et al. Active model-based balancing strategy for self-reconfigurable batteries [J]. Journal of Power Sources, 2016, 322;129-137.
- [9] ZHENG X X, LIU X T, HE Y, et al. Active vehicle battery balancing scheme in the condition of constant-voltage/current charging and discharging[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 66(5): 3714-3723.
- [10] DAOWD M,OMAR N,BOSSCHE P D,et al. A review of passive and active battery balancing based on MATLAB / Simulink[J]. International Review of Electrical Engineering, 2011,6 (7):2974-2989.
- [11] 冯飞,宋凯,逯仁贵,等.磷酸铁锂电池组均衡控制策略及荷电 状态估计算法[J]. 电工技术学报,2015,30(1):22-29.
 FENG Fei,SONG Kai,LU Rengui, et al. Equalization control strategy and SOC estimation for LiFePO₄ battery pack[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 22-29.
- [12] MA Y, DUAN P, SUN Y S, et al. Equalization of lithium-ion battery pack based on fuzzy logic control in electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8):

6762-6771.

- [13] GAO Z C,CHIN C,WOO W,et al. Integrated equivalent circuit and thermal model for simulation of temperature-dependent LiFePO₄ battery in actual embedded application[J]. Energies, 2017,10(1):85.
- [14] LI W B, KANG L Y, GUO X W, et al. Multi-objective predictive balancing control of battery packs based on predictive current[J]. Energies, 2016,9(4):298.
- [15] WANG Y J, PAN R, LIU C, et al. Power capability evaluation for lithium iron phosphate batteries based on multiparameter constraints estimation[J]. Journal of Power Sources, 2018,374:12-23.
- [16] 朱方方,王康丽,王大磊,等. 串联液态金属电池组均衡控制策略研究[J]. 电源技术,2018,42(8):1209-1212.
 ZHU Fangfang, WANG Kangli, WANG Dalei, et al. Study on strategy of balance control for liquid metal battery in series
 [J]. Chinese Journal of Power Sources,2018,42(8):1209-1212.
- [17] CAO X, ZHONG Q C, QIAO Y C, et al. Multilayer modular balancing strategy for individual cells in a battery pack[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2):526-536.
- [18] LI Z, HUANG J, LIAW B Y, et al. On state-of-charge determination for lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2017, 348:281-301.

作者简介:



张 娥(1994—),女,湖北恩施人,硕 士研究生,主要研究方向为电池均衡管理 (**E-mail**:ezhang@hust.edu.cn);

徐 成(1992—),男,江苏扬州人,博 士研究生,主要研究方向为电池建模及状态 估计(**E-mail**:cheng_xu@hust.edu.cn);

王康丽(1979—), 女, 湖北武汉人, 教授, 博士研究生导师, 通信作者, 主要研究方向为电力储能技术(E-mail; klwang@hust.

张娥

edu.cn);

蒋 凯(1976—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生 导师,主要研究方向为电化学储能、新能源材料(E-mail: kjiang@hust.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Segmented hybrid equalization control strategy for battery packs

ZHANG E, XU Cheng, WANG Kangli, JIANG Kai

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to solve the inconsistency problem of battery packs caused by the difference of manufacturing technology and application environment, aiming at the battery system with characteristics of wide voltage platform and fast voltage change rate at the charging and discharging terminals, a segmented hybrid equalization control strategy based on voltage and SOC (State Of Charge) is proposed. An active equalization topology structure based on multi-winding structure of bi-directional fly-back transformer is proposed based on MATLAB / Simulink simulation platform, and the effectiveness of the proposed segmented hybrid equalization control strategy is verified under several different operation conditions of the battery packs. Compared with the equalization control strategy with only one single equalization variable, simulative results show that the proposed segmented hybrid equalization control strategy can maintain good balance effect of battery pack voltage and SOC at the same time after charging or discharging, and improve the consistency of battery packs more effectively.

Key words: battery packs; inconsistency; equalization; topology structure; hybrid control strategy