

基于 DC/DC 双向变换器的多电池主动均衡技术

王 津¹, 王文斌²

(1. 西交利物浦大学 智能工程学院, 江苏 苏州 215028;

2. 温州德力西集团有限公司, 浙江 温州 325604)

摘 要: 针对锂电池数量多、不一致性较严重的问题, 提出一种结合模糊控制理论的 DC/DC 双向主动均衡电路拓扑。以荷电状态(SOC)为均衡判断依据, 采用均值-差值法进行主动均衡, 实现了单个单体电池的均衡以及多个单体电池间的交替均衡。仿真结果表明, 所提电池主动均衡策略可以有效改善多个电池的不一致性问题, 且拥有较快的均衡速度, 有效地实现了电池间的 SOC 主动均衡。

关键词: 锂电池; 模糊控制理论; DC/DC 双向主动均衡; 荷电状态; 均值-差值法

中图分类号: TM912 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2022)10-0040-06

doi: 10.12177/emca.2022.109

Multi-Cell Active Equalization Technology Based on DC/DC Bidirectional Converter

WANG Jin¹, WANG Wenbin²

(1. School of Advanced Technology, Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou 215028, China;

2. Wenzhou Delixi Group Co., Ltd., Wenzhou 325604, China)

Abstract: A DC/DC bidirectional active equalization circuit topology combined with fuzzy control theory is proposed for the problems of large number of lithium cells and serious inconsistency. Taking the state of charge (SOC) as the basis for equalization judgment, the mean-difference method is used to carry out active equalization, which realizes the equalization of a single cell and the alternate equalization between multiple single cells. The simulation results show that the proposed cell active equalization strategy can effectively improve the inconsistency of multiple cells and has a fast equalization speed, which effectively realizes the active SOC equalization among cells.

Key words: lithium cell; fuzzy control theory; DC/DC bidirectional active equalization; state of charge; mean-difference method

0 引 言

目前,随着科学技术的飞速发展,世界各国对能源与环境危机的关注日益增多。因此,在能源紧缺以及环境污染的双重压力下,世界各国都在积极进行新能源技术的研究开发。电池作为目前最流行的储能装置之一,可以储存由风能、太阳能、核能等可再生能源产生的电能,从而避免由于新能源发电的不确定性和间歇性产生的电网系统

不稳定和电能浪费问题^[1]。在绿色能源的应用中,锂电池以其高能量比、无记忆效应、循环寿命长等优点被广泛应用^[2-3]。目前,电池应用得比较广泛的领域是电动汽车领域。电动汽车搭载的电池包由若干单体电池组成,但是在实际的制造和使用过程中,各单体电池由于内部电阻、温度等特性的不同,极易出现电池间不平衡现象,影响电动汽车的续航能力^[4-6]。

电池均衡主要分为主动均衡和被动均衡两

收稿日期: 2022-07-22; 收到修改稿日期: 2022-09-04

作者简介: 王 津(1999—),男,硕士研究生,研究方向为新能源控制技术、微电网的主动规划。

王文斌(1972—),男,高级工程师,研究方向为新型控制变压器技术。

种^[7]。被动均衡是能量耗散型均衡方法,随着电力电子技术的不断发展,能量耗散型均衡方法正被逐步淘汰。各类基于高频开关电源技术的有源均衡电路在提高均衡能力的同时,又简化了电路的均衡成本,逐渐成为国内外专家研究的重心。

文献[8]针对传统集中式电池均衡体积大、不易扩展、电路元件多、成本高的问题,提出将 Buck-Boost 变换器与开关矩阵相结合来实现电池均衡,并利用电感的时分复用有效地减少了电路的器件成本和体积大小,且电感电流处于断续模式,有效地消除了单体电池间的交叉影响。文献[9]针对锂离子电池长期串联使用出现的不一致问题,提出了一种基于双向反激变换器的新型低成本均衡电路,有效降低了电路的成本,并有良好的均衡效果。文献[10]提出了一种基于 DC/DC 变换器拓扑的有源电荷均衡技术,该技术在电池组充电/放电以及空闲期间时,在电压和电荷方面实现电池组中的电池单元均衡,使电池组操作的能量和可靠性最大化,并由电压监控电路控制的一组 MOSFET 开关管将电荷从最高电压的单体电池转移到较弱的单体电池中去,以确保每个电池具有相同的输出电压。文献[11]提出了一种基于 Buck-Boost 变换器的有源平衡电路来处理电池组的不平衡状态,该电路利用低频双向开关来控制电感的状态(连接、断开和短路状态),通过控制电感的状态,可以在相邻单元或几个相邻单元之间构建多种降压-升压变换器。文献[12]提出了一种有源均衡电路和一种新颖的均衡策略

来实现能量再分配,双向拓扑由正激变压器和开关矩阵组成,并利用聚类分析和遗传算法来实现电池均衡,均衡后电池组容量提高了 16.84%,均衡时间缩短了 23.8%。文献[13]提出了一种基于传统 Buck-Boost 电路的新型非耗散两级均衡电路拓扑,用以实现高效率、低成本的串联锂离子电池组均衡。文献[14]提出了一种基于单元化多绕组变压器的均衡方法,正激变换器和反激变换器同时存在,前向转换器用于均衡同一子单元中的电池单元,而回扫变换器用于不同子单元的均衡。

虽然以上研究均提出了电池能量双向传输的概念,但是缺少对能量双向传输力度的控制作用。本文将在上述研究的基础上,提出将双向变换器、开关选通矩阵、正负极开关选通矩阵和模糊控制理论相结合的方式来实现对多电池的主动均衡。

1 均衡电路总体结构

本文提出的电池主动均衡电路中每个单体电池包含开关阵列、正负极开关阵列、双向 DC/DC 电路,总体结构如图 1 所示,总体均衡电路原理图如图 2 所示。

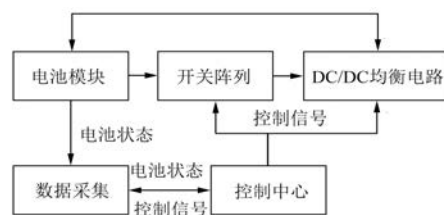


图 1 均衡系统总体结构图

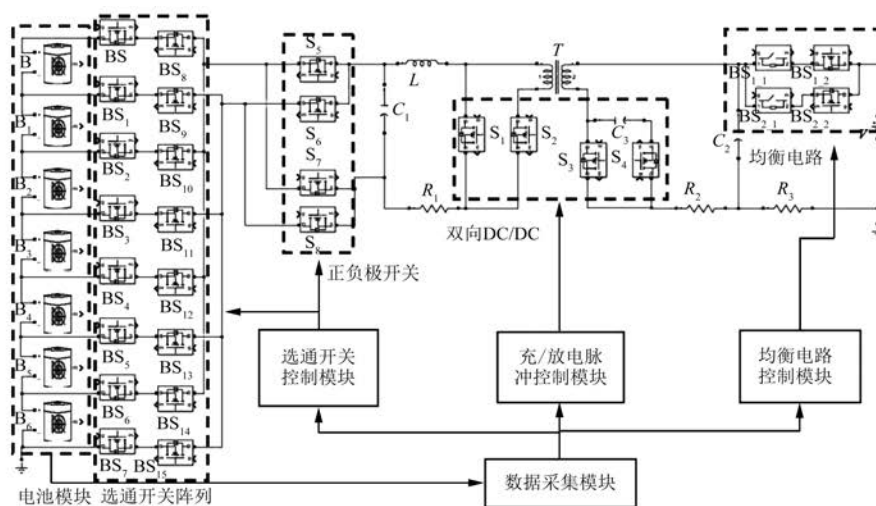


图 2 总体均衡电路原理图

电池模块由 7 块 3.2 V、40 Ah 的锂电池组成;开关阵列由 16 个 MOSFET 选通开关管与 4 个 MOSFET 正负极开关管组成;双向 DC/DC 的充/放电电路由 4 个 N-MOSFET 开关管组成;均衡电路由 2 个理想开关和 2 个 MOSFET 开关管组成。

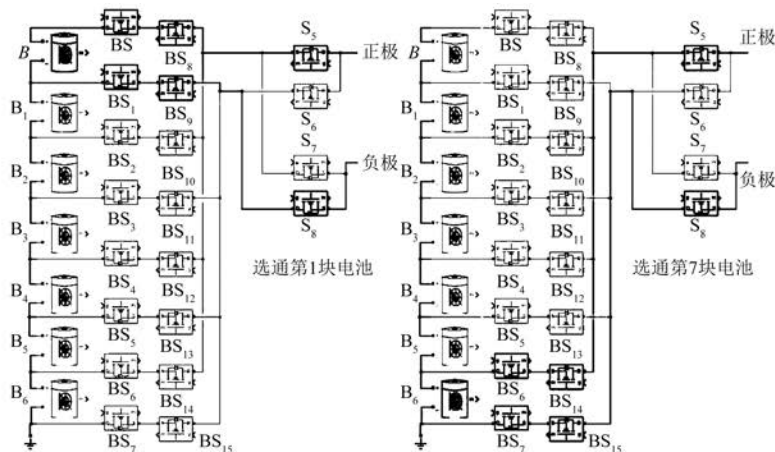


图3 开关阵列选通状态图

1.2 充/放电电路分析

DC/DC 双向变换器的拓扑如图 4 所示。该拓扑采用的是双向正激变换器,左侧 U_1 表示单体电池电压,右侧 U_2 表示 1 个 42 V 的直流电源。该电路拓扑主要由 1 个变压器 T, 2 个采样电阻 R_1 、 R_2 , 1 个保护电阻 R_3 , 2 个滤波电容 C_1 、 C_2 , 1 个箝位电容 C_3 , 1 个滤波电感 L , 4 个 MOSFET 开关管 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 , 2 个理想开关 $BS_{1,1}$ 、 $BS_{2,1}$ 和 2 个对应的充放电选通 MOSFET 开关管 $BS_{1,2}$ 、 $BS_{2,2}$ 组成。

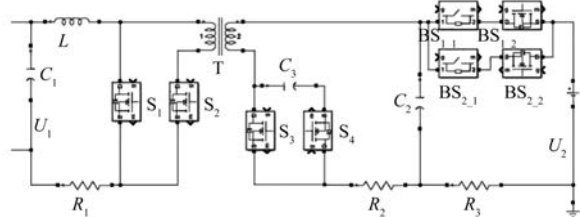


图4 DC/DC 双向变换器拓扑图

当该电路拓扑处于充电模式时,理想开关 $BS_{2,1}$ 闭合,充电 MOSFET 开关管 $BS_{2,2}$ 闭合(根据均衡电流大小来决定占空比大小),能量从高压侧传向低压侧的驱动时序图如图 5 所示。

当该电路拓扑处于放电模式时,理想开关 $BS_{1,1}$ 闭合,放电 MOSFET 开关管 $BS_{1,2}$ 闭合(根据均衡电流大小来决定占空比大小),能量从低压

1.1 开关阵列分析

选通开关阵列的主要作用是选通某一块单体电池,选通充电或是放电的 MOSFET 开关管,从而实现单体电池的充放电操作,选通开关阵列状态如图 3 所示。

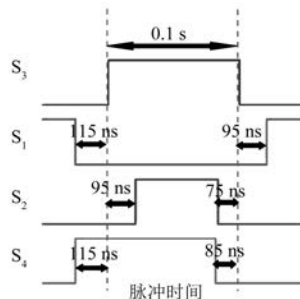


图5 充电状态的驱动时序图

侧传向高压侧的驱动时序图如图 6 所示。

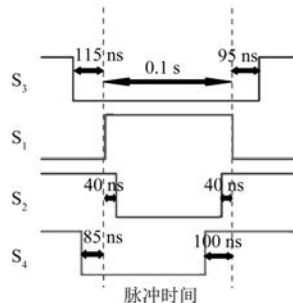


图6 放电状态的驱动时序图

2 均衡电路参数计算

2.1 变压器参数

首先,变压器输入和输出的关系如下所示:

$$U_o = \frac{1}{n} D U_i \quad (1)$$

式中: U_o 为输出电压; n 为匝数比; D 为高压侧开关管占空比; U_i 为输入电压。

本文所提 7 节单体电池对应的变压器匝数比为 $n = \frac{N_p}{N_s} = 0.25 \times 7 = 1.75$, N_p 为原边绕组匝数, N_s 为副边绕组匝数。变压器原边绕组的最小电感值 $L_{p(\min)} = 190 \mu\text{H} \times (7/14) = 95 \mu\text{H}$ 。因为原副边绕组的电感值等于原副边绕组的匝数平方之比, 所以可求得副边绕组的最小电感值为 $L_{s(\min)} = L_{p(\min)} / n^2 \approx 31.02 \mu\text{H}$ 。

2.2 绕组匝数

变压器高压侧的匝数需要根据最小输入电压来进行确定, 如下所示:

$$N_p = \frac{U_{i(\min)} D_{1\max}}{f_s \Delta B A_e} \quad (2)$$

式中: $U_{i(\min)}$ 为输入电压最小值; $D_{1\max}$ 为高压侧开关管最大占空比; f_s 为开关频率; ΔB 为磁通变化量; A_e 为磁芯有效截面积。

本文 $U_{i(\min)}$ 取 $\pm 20\%$ 的误差, $D_{1\max}$ 取 0.4, f_s 取 250 kHz, ΔB 取 0.15 T, A_e 取 3.01×10^{-5} , 得出 N_p 为 11.56。

考虑到实际的可操作性, 这里取原边绕组匝数为 14, 则变压器副边绕组匝数 $N_s = \frac{N_p}{n} = \frac{14}{1.75} = 8$ 。

接下来, 需要验证原边绕组 14 匝数情况下的磁通密度峰值, 确保不会出现磁饱和现象, 即

$$B_{\max} = \Delta B = \frac{U_{i(\min)} D_{1\max}}{f_s N_p A_e} \approx 0.128 \text{ T} < 0.150 \text{ T}。$$

3 基于模糊控制的均衡电路

模糊控制理论的核心是建立语言分析的数学模型, 将自然语言转化为计算机语言^[15]。模糊控制的过程主要分为 4 步: 模糊化、设置规则表、模糊推理和解模糊。

将模糊控制算法用于均衡电路主要是为了对均衡电流的大小进行控制, 避免大电流对电池造成伤害、引发危险事故。本文采用的模糊控制器是两输入、单输出的形式, 将平均荷电状态 (SOC) 值 (电化学储能过程中储能介质中实际存在的电

荷数占额定储能容量对应的储能介质中含有的电荷数的百分率) 作为输入量 E , 将差值 SOC 值作为输入量 EC , 均衡电流 I_{eq} 作为输出量 U 。电池 SOC 的安时积分计算公式如下所示:

$$SOC = 1 - \frac{\int I dt}{Q} \quad (3)$$

式中: I 为电流; Q 为额定容量。

$$\overline{SOC} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n SOC_i \quad (4)$$

$$\Delta SOC = \overline{SOC} - SOC_i \quad (5)$$

式中: n 为单体电池的数目; SOC_i 为第 i 个单体电池的电荷量。

根据经验, 选择三角形的隶属度函数, 隶属度的计算公式如下所示:

$$X(x) = \begin{cases} (x_{i+1} - x) / (x_{i+1} - x_i) & , x \in [x_i, x_{i+1}] \\ (x - x_i) / (x_{i+1} - x_i) & , x \in [x_{i+1}, x_{i+2}] \end{cases} \quad (6)$$

首先设置 E 的特征点论域为 $\{0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00\}$, 设置 EC 值的特征点论域为 $\{-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3\}$, 设置 U 的特征点论域为 $\{-5.0, -3.5, -1.5, 0, 1.5, 3.5, 5.0\}$ 。 E 、 EC 、 U 三者的隶属度函数如图 7~图 9 所示。

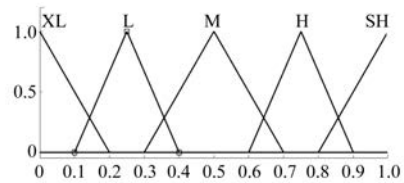


图 7 E 的隶属度函数

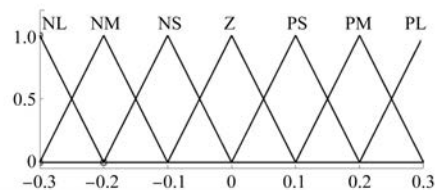


图 8 EC 的隶属度函数

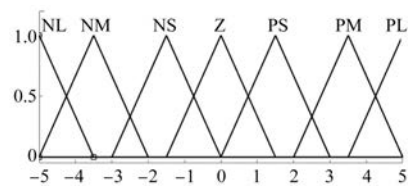


图 9 U 的隶属度函数

模糊控制的规则如表 1 所示,表中的规则使用的是“if 平均 SOC……and 差值 SOC……then I_{eq} ……”的条件语句,每个值都代表一条条件语句。

表 1 均衡电流 I_{eq} 模糊控制规则表

I_{eq}		差值 SOC						
		NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
平均 SOC	XL	NM	NS	NS	Z	PS	PS	PM
	L	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
	M	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
	H	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
	SH	NM	NS	NS	Z	PS	PS	PM

根据模糊控制规则表可以得出不同平均 SOC 和差值 SOC 下的均衡电流大小,当均衡电流输出的电流大小为正时,需要为对应的单体电池充电;若电流大小为负时,需要为对应的单体电池放电。图 10 所示为该模糊控制系统的三维坐标图。

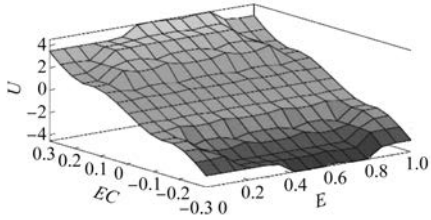


图 10 两输入量与均衡电流对应的三维坐标图

如图 10 所示,当给定输入量 E 为 0.5、 EC 为 0.3 时,输出量 U 的大小为 4.53 A。

4 仿真与结果分析

在进行仿真之前,设定好开关阵列选通和充/放电脉冲的选通规则。开关阵列选通的代码编写规则:第一步,利用“if”语句判断此时哪一块单体电池的差值 SOC 最大,进而对该块电池进行相应的充/放电操作;第二步,根据单体电池选通对应的正负极开关管进行相应的充/放电操作。充/放电脉冲的代码编写规则:利用“if”语句判断此时均衡电流的正负极性,从而进行相应的充/放电操作(正为充电,负为放电)。均衡电路的代码编写规则:将均衡电流的绝对值分为几个区间,均衡电流的绝对值大,就执行最大占空比,以最大可能进行充/放电操作;反之,执行最小占空比。

接下来,本文主要基于 MATLAB/Simulink 平

台进行仿真研究,首先进行未优化电路的仿真(未进行变压器参数优化和模糊控制算法优化),设定 7 块单体电池的 SOC 分别为 61%、59%、58%、57%、56%、55%、52%,单体电池的详细参数如表 2 所示,仿真结果如图 11 所示。

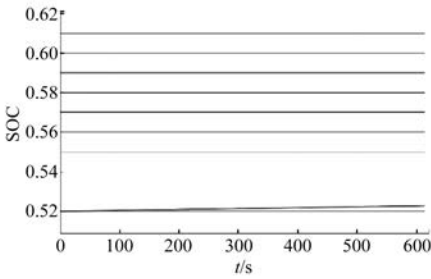


图 11 未进行优化的电池均衡波形图

表 2 单体电池的详细参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
标称电压/V	3.2	标称放电电流/A	17.391 3
额定容量/Ah	40	内阻/ Ω	0.000 8
最大容量/Ah	40	标称电压下的容量/Ah	36.173 9
截止电压/V	2.4	满充电电压/V	3.724 8

进行第一组仿真,设定 7 块单体电池的 SOC 分别为 61%、59%、58%、57%、56%、55%、52%,仿真结果如图 12 所示。

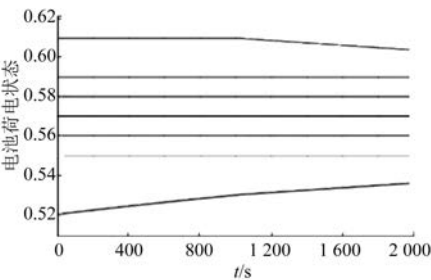


图 12 第一组电池主动均衡波形图

如图 11 和 12 所示,截取仿真时间为 600 s 时的电池 SOC 进行对比分析,此时,未优化的电池电路中,第 7 块单体电池的 SOC 约为 52.25%,而经过优化的电池电路中,第 7 块单体电池的 SOC 约为 52.70%,从波形图以及数据对比中可以明显看出经过优化后的电池主动均衡电路的优越性,随着时间的推移,均衡效果也在逐渐加强。

然后,进行第二组仿真,设定 7 块单体电池的 SOC 分别为 58%、57%、60%、55%、54%、51%、

53%, 仿真结果如图 13 所示。由仿真结果可以看出, 本文的电池均衡电路会优先执行差值 SOC 最大的单体电池, 但是随着差值 SOC 最大的单体电池的电荷量接近差值 SOC 排第二的单体电池, 两者会交替进行充/放电操作, 逐渐趋近于平均 SOC, 越来越多的单体电池会加入交替进行充/放电的操作, 进而实现多电池的主动均衡。

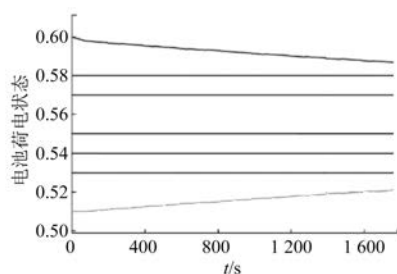


图 13 第二组电池主动均衡波形图

5 结 语

本文针对当前耗散型电池均衡方法的问题和电池使用过程中存在差异性的问题, 提出一种双向 DC/DC 均衡电路并结合模糊控制理论来控制均衡电流大小。本文以 SOC 为判断依据, 采用均值-差值法进行均衡, 可以同时均衡多个单体电池, 可控性强。根据仿真结果, 本文提出的 DC/DC 双向主动均衡电路和模糊控制理论结合的均衡策略可以快速改善电池组的不一致性问题, 均衡时间较快, 对电池均衡起到了积极作用。

【参 考 文 献】

- [1] 张宇雄. 含微电网的主动配电网规划研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
- [2] LU L, HAN X, LI J, et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2013, 226: 272.
- [3] 陈洋, 刘晓芳, 杨世彦, 等. 串联电池组有源均衡拓扑结构综述[J]. 电源学报, 2013(5): 28.
- [4] 牛萌, 姜久春, 郭宏榆. 混合动力车用电池均衡方案研究[J]. 微处理机, 2010, 31(5): 125.
- [5] 杨春雷, 刘志远. 一种电动汽车动力电池均衡控制方法的设计[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(8): 1186.
- [6] XU A, XIE S, LIU X. Dynamic voltage equalization for series-connected ultracapacitors in EV/HEV applications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(8): 3981.
- [7] 杨扬, 谢长君, 朱文超. 退役锂电池梯次利用主动均衡方法研究[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(6): 50.
- [8] 李小龙, 徐顺刚, 许建平, 等. 一种单电感双向电池均衡电路[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(4): 90.
- [9] 李伟, 吴靖, 郑伟彦, 等. 基于双向反激变换器的电池均衡电路研究[J]. 电源技术, 2022, 46(1): 85.
- [10] 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.
- [11] WANG S, YANG S Y, YANG W, et al. A new kind of balancing circuit with multiple equalization modes for serially connected battery pack[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 2142.
- [12] SUN J L, LIU W, TANG C Y, et al. A novel active equalization method for series-connected battery packs based on clustering analysis with genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7853.
- [13] DING X F, ZHANG D H, CHENG J W, et al. A novel active equalization topology for series-connected lithiumion battery packs[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(6): 6892.
- [14] LI Y, XU J, MEI X S, et al. A unitized multiwinding transformer-based equalization method for series-connected battery strings[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 11981.
- [15] 缪家森. 储能锂电池组 SOC 估算及均衡控制策略研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2020.