

并联锂离子电池组建模及不平衡电流分析

王开让^{1, 2*}, 刘辉^{1, 2}, 邹乃鹏³, 张彩萍³, 董建明^{1, 2}, 刘迪^{1, 2}

(1. 国网冀北电力科学研究院(华北电力科学研究院有限责任公司), 北京市 西城区 100045;

2. 国家电网公司风光储联合发电运行技术实验室, 北京市 西城区 100045;

3. 北京交通大学电气工程学院动力电池实验室, 北京市 海淀区 100028)

Modeling and Unbalanced Current Analysis of Parallel Lithium-ion Battery Packs

WANG Kairang^{1,2*}, LIU Hui^{1,2}, ZOU Naipeng³, ZHANG Caiping³, DONG Jianming^{1,2}, LIU Di^{1,2}

(1. State Grid Jibei Electric Power Research Institute (North China Electric Power Research Institute Co., Ltd.),

Xicheng District, Beijing 100045, China;

2. State Grid Wind-Photovoltaic-Energy Storage Hybrid Power Generation Technology Laboratory, Xicheng District, Beijing 100045, China;

3. Power Battery Laboratory, School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100028, China)

Abstract: In recent years, battery energy storage has played an important role in power systems due to its fast response speed and high energy density. In order to meet the requirements of practical applications, battery energy storage systems need to connect batteries or battery packs in parallel to achieve a higher usable capacity, but in practice, parallel batteries will have current imbalance due to internal resistance, capacity, SOC, etc., to a certain extent. The above factors restrict the battery charging and discharging current and usage conditions, and affects the battery performance. Aiming at the cumbersome process of collecting the branch current of the parallel battery pack and the complicated state estimation, a simulation model of the parallel battery pack is established based on the second-order equivalent circuit of the battery and the loop current method. The model can calculate the current of the parallel branch according to the performance parameters of the lithium-ion battery and the state equation, and then estimate the state of the parallel battery pack, eliminating the need for the detection of the current of the parallel branch. At the same time, it focuses on the phenomenon of unbalanced current in the branches of parallel battery packs. Taking lithium iron phosphate batteries as an example, the charging characteristics of parallel battery packs are analyzed. In view of the complicated and difficult-to-decouple characteristics of the unbalanced current in the branch circuit of parallel battery packs, the control variable method is adopted to analyze the influence of the internal resistance, capacity, initial SOC and other factors on the branch current point in detail through

the model. The results to provide a referencedesign, group optimization and performance analysis of the battery pack.

Keywords: lithium-ion battery energy storage; parallel battery pack; loop current; unbalanced branch current

摘要: 近年来电池储能以其响应速度快、能量密度高等优点, 在电力系统中发挥重要作用。为满足实际应用的要求, 电池储能系统需要将电池或电池组并联从而达到较高的可用容量, 但并联电池在实际中受内阻、容量、荷电状态(SOC)等影响将出现电流不平衡现象, 一定程度上制约了电池充放电电流和使用条件, 影响了电池性能。针对并联电池组支路电流采集过程繁琐且状态估计复杂的情况, 以电池的二阶等效电路为基础, 结合回路电流法建立了并联电池组的仿真模型。模型能够根据锂电池的性能参数及状态方程实现并联支路电流的计算, 进而估计并联电池组的状态, 省去了对并联支路电流的检测环节。同时重点研究了并联电池组的支路不平衡电流现象, 以磷酸铁锂电池为例, 分析了并联电池组的充电特性。针对并联电池组的支路不平衡电流影响因素较为复杂、难以解耦的特性, 采用控制变量法, 通过模型详细分析了内阻、容量、初始SOC等因素对支路电流点的影响, 为并联电池组的设计、成组优化及性能分析提供了参考。

关键词: 锂电池储能; 并联电池组; 回路电流; 支路不平衡电流

0 引言

储能系统具有削峰填谷的功能^[1-3], 并且能保证电力系统的平稳输出^[1-2], 提高供电的可靠性, 近年来在电力系统中得到了广泛应用。锂离子电池具有效

基金项目: 国家电网公司科技项目(5419-202114240A-0-0-00)。

Science and Technology Foundation of SGCC (5419-202114240A-0-0-00).

率高、能量高、体积小等优势,在储能电站的建设中占有重要地位^[4]。为了实现新能源储能的协调运行和有效调度,需要针对新能源电站开展建模仿真方面的工作。目前的研究多是对锂电池单体和串联模块的建模,对并联电池模块的建模以及支路不均衡电流的研究较少。但实际中,由于储能系统要求的电池容量较大,电压等级较高,现有的电池技术难以在兼顾安全性的同时直接生产符合要求的单体,需要多个电池串联或并联以达到储能系统要求的可用容量,因此有必要继续开展电池组并联建模的研究工作。并联电池组由于各个单体在内阻、容量、开路电压等方面均存在差异,导致其使用过程中存在支路电流不均衡现象,在长时间的循环过程中这一现象会加剧电池组的不一致性,进而影响电池组的性能,因此对并联电池模块的建模以及支路不均衡电流的研究有重要的实际意义。

目前,研究学者已对储能电池系统的建模仿真做出了大量研究。文献[5]提出了一种大规模梯次利用电池组的建模方法,模型精度较高,但其仅限于串联电池模块,并未考虑加入并联电池模块。文献[6]基于不同循环条件和不同电池参数差异条件的并联电池实验,分析了支路电流不平衡的起因和结果,但其仅通过实验无法实现对影响支路电流各个因素的解耦。文献[7]介绍了内部参数对电池组并联数的影响,提出一种改进的电池组建模方法,并对并联电池组的安全性进行了分析,但并未研究支路不均衡电流对电池内部参数的影响。也有学者针对并联电池组的状态估计做了深入研究,模型能够准确估计并联电池组的荷电状态(SOC),但其需要采集支路电流,数据获取较为繁琐^[8-9]。

针对并联电池组存在的不均衡支路电流问题,本文结合回路电流法和锂电池的二阶等效电路模型,提出了一种包含支路电流计算方法的并联电池组建模方法,模型能够根据锂电池的性能参数及状态方程实现并联支路电流的计算,进而估计并联电池组的状态,省去了对并联支路电流的检测环节。

1 电池组模型和参数辨识方法

1.1 电池单体模型

目前锂离子电池存在多种等效电路模型,其中一阶RC等效电路模型不仅具有较好的精度而且计算量较小,得到了广泛的应用^[10]。在一阶RC模型的基础上

增加一个RC并联网路则构成了二阶RC模型,相比较一阶RC电路而言,二阶RC模型虽然增加了一个RC环节导致计算量更大,但是其能够将锂离子电池充放电过程中的极化效应进一步划分为电化学极化和浓差极化,具有更高的精度^[11]。

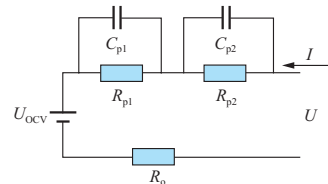


图1 单体电池等效电路模型

Fig. 1 Equivalent circuit model of single battery

图1为单体电池二阶RC等效电路模型。在二阶RC模型中^[12-13],由基尔霍夫电压定律和电路的状态响应方程可知:

$$U_O = U_{OCV} + IR_{\Omega} + U_{p1}(0)e^{-\frac{t}{R_{p1}C_{p1}}} + IR_{p1}\left(1 - e^{-\frac{t}{R_{p1}C_{p1}}}\right) + U_{p2}(0)e^{-\frac{t}{R_{p2}C_{p2}}} + IR_{p2}\left(1 - e^{-\frac{t}{R_{p2}C_{p2}}}\right) \quad (1)$$

上式中,欧姆内阻可通过式(2)求出:

$$R_{\Omega} = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (2)$$

极化参数 R_{p1} 、 C_{p1} 、 R_{p2} 、 C_{p2} 可通过最小二乘法拟合得到^[14-15],OCV(开路电压)曲线则采用0.05 C小电流充放电时的电压曲线^[16]。

1.2 电池并联模型

基于电池单体的状态方程和二阶等效电路模型,N个电池并联的二阶等效电路模型和状态方程如图2所示。

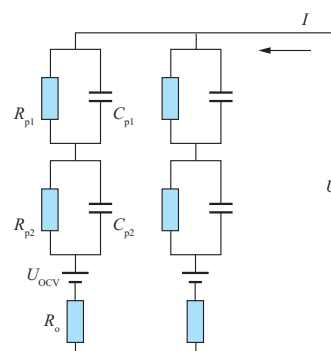


图2 并联电池组等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of parallel battery packs

根据基尔霍夫电压定律可得:

$$\begin{cases} U = U_{OCV1} + I_1 R_{\Omega 1} + U_{P11} + U_{P12} \\ U = U_{OCV2} + I_2 R_{\Omega 2} + U_{P21} + U_{P22} \\ U = U_{OCV3} + I_3 R_{\Omega 3} + U_{P31} + U_{P32} \\ \vdots \\ U = U_{OCVn} + I_n R_{\Omega n} + U_{Pn1} + U_{Pn2} \end{cases} \quad (3)$$

根据基尔霍夫电流定律可得:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (4)$$

关联式(3)、式(4), 可列出 n 个电池并联的矩阵方程为:

$$\begin{bmatrix} R_{\Omega 1} & -R_{\Omega 2} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & R_{\Omega 2} & -R_{\Omega 3} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & R_{\Omega(k-1)} & -R_{\Omega k} \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{k-1} \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{OCV2} - U_{OCV1} + U_{P21} - U_{P11} + U_{P22} - U_{P12} \\ \vdots \\ \vdots \\ U_{OCV k} - U_{OCV(k-1)} + U_{Pk1} - U_{P(k-1)1} + U_{Pk2} - U_{P(k-1)2} \\ I \end{bmatrix} \quad (5)$$

在对上述矩阵方程求解时, n 只并联电池的支路电流 I_k 为未知量, 极化电压 U_{Pk1} 和 U_{Pk2} 也均为未知量, 共有 $3n$ 个未知量, 同时 $2n$ 个RC并联支路有 $2n$ 个状态微分方程, 联立以上 $3n$ 个方程即可求出二阶RC等效电路状态方程的解。

$$\frac{dU_{pk1}}{dt} = -\frac{U_{pk1}}{R_{pk1}C_{pk1}} + \frac{I_k}{C_{pk1}} \quad (6)$$

$$\frac{dU_{pk2}}{dt} = -\frac{U_{pk2}}{R_{pk2}C_{pk2}} + \frac{I_k}{C_{pk2}} \quad (7)$$

在MATLAB的S函数中编写上述状态方程, 并对其求解。需要注意的是, 在求解微分方程时除状态变量外的其他变量都必须为已知量, 也即支路电流 I_k 必须有初值。由于仿真的初始时刻各个支路的极化电压均为0, 其对应的极化电阻和极化电容也均为0, 可以认为在仿真的初始时刻支路电流按照单体的OCV和欧姆内阻分配, 由此可以确定各个支路电流的初值, 而后再将该支路电流初始值作为极化电压状态微分方程的已知量, 求解下一时刻的极化电压, 进而求解此时刻下电池的OCV、欧姆内阻以及极化参数, 最后再次迭代求得新的支路电流, 以此类推。

1.3 仿真流程

最终并联电池组仿真模型的流程图如图3所示。

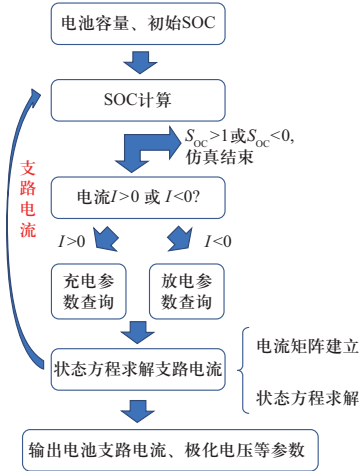


图3 并联电池组仿真流程图

Fig. 3 Simulation flow chart of parallel battery packs

并联电池组仿真模型的输入参数包括不同SOC点下各个单体的OCV、 R_{Ω} 、 R_{p1} 、 R_{p2} 以及 C_{p1} 、 C_{p2} , MATLAB中的查表模块则能够根据输入的SOC对应的参数值将参数在全SOC区间内进行线性插值, 使得每一个SOC点下都有与之对应的状态参数。仿真开始时应确定各个单体的容量以及初始SOC值, 随着仿真的进行, 电池的SOC发生变化, 元件参数也随之改变, 每个时间点的支路电流则可以通过上一时刻的极化电压和此时刻的元件参数计算得到, 最终实现并联电池组支路电流的计算及各个状态量的仿真。

2 算例分析

2.1 数据介绍

实验测试对象为3只60 Ah的磷酸铁锂电池, 采用Arbin公司的中压电池模组充放电设备进行并联实验。为了避免其他阻抗对并联单体电流的影响, 实验采用不需要介入电池并联回路的霍尔传感器测量并联电池的支路电流。霍尔传感器的量程为 $-100 \text{ A} \sim +100 \text{ A}$, 测量精度0.5%, 输出为 $4 \sim 20 \text{ mA}$ 的标准信号, 采用TMA32数据记录仪记录电流数据。

在实验中, 并联电池链接部分的扭矩大小会影响到各个并联支路的阻抗, 进而影响到支路电流的分布, 所以实验过程中要保证各个连接件部分的扭矩大小相同。

3只容量为60 Ah的磷酸铁锂电池并联后容量为180 Ah, 电压范围为 $2.5 \sim 3.65 \text{ V}$, 电池组放置于 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温箱中, 充电方式为 0.5 C 恒流充电。各支路电流值如图4所示。

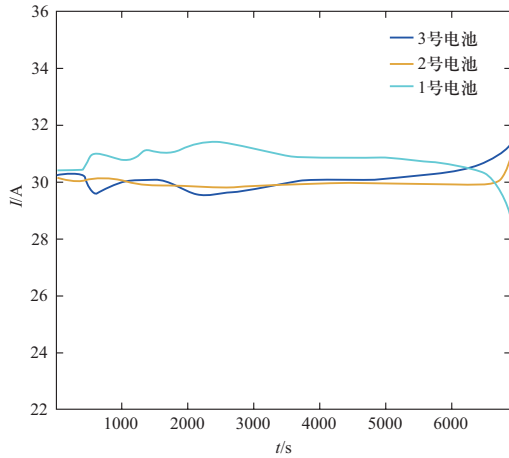


图4 并联电池组支路不均衡电流实验值

Fig. 4 Experimental value of unbalanced current for parallel battery pack branch

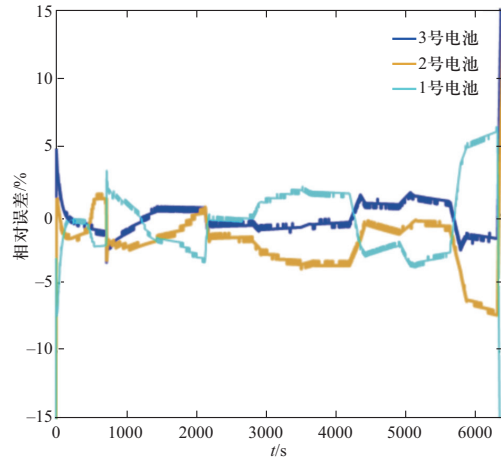


图6 相对误差

Fig. 6 Relative error

2.2 并联仿真验证

采用以上实验结果对模型精度进行验证, 结果如图5和图6所示。

对比图5和图6可知, 使用0.5 C对电池恒流充电时, 起始阶段由于磷酸铁锂电池SOC相同, 支路电流差异较小。进入电压平台区后, 三只电池的内阻和极化参数存在差异, 因此支路电流差异逐步扩大, 导致内阻较小的电池支路电流较大。最后在充电末期, 支路电流较大的电池SOC较高, 率先脱离电压平台区, OCV上升较快, 接受电流能力下降, 导致其支路电流迅速下降, 同时其他两只电池支路电流会迅速上升, 导致支路电流超过电池的最大容许倍率, 引起过流。

通过对并联模组支路电流仿真结果和真实值的比较可以得知, 模型的相对误差均在3%以内, 仅在充

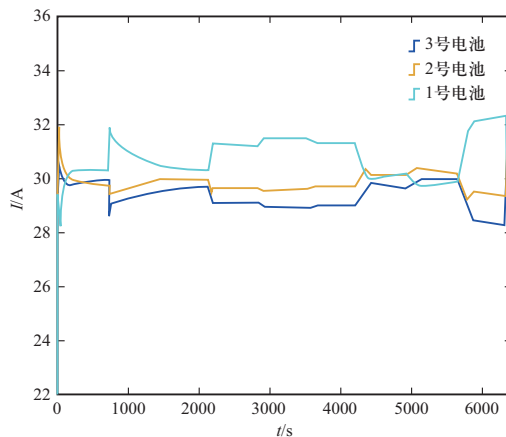


图5 三并电池模组支路电流仿真值

Fig. 5 Simulation value of branch current for parallel battery modules

电末期相对误差较大, 原因是磷酸铁锂电池充电末期电压上升速度较快, 因而电池OCV-SOC曲线误差较大, 同时HPPC实验辨识的内阻参数误差也相对较大, 最终导致模型在充电末期的精度下降。

3 关键特征参数对充放电特性的影响及仿真分析

3.1 并联电池组充放电测试及不均衡电流分析

实验选用三只容量为60 Ah的磷酸铁锂电池并联, 模组容量为180 Ah, 电压范围为2.5~3.65 V, 电池组放置于25 °C的温箱中, 充电方式为0.5 C恒流充电。

各个电池的内阻情况如图5所示。

图4中展示了三只磷酸铁锂电池并联充电过程中的支路不均衡电流情况, 图7则是三只单体每间隔

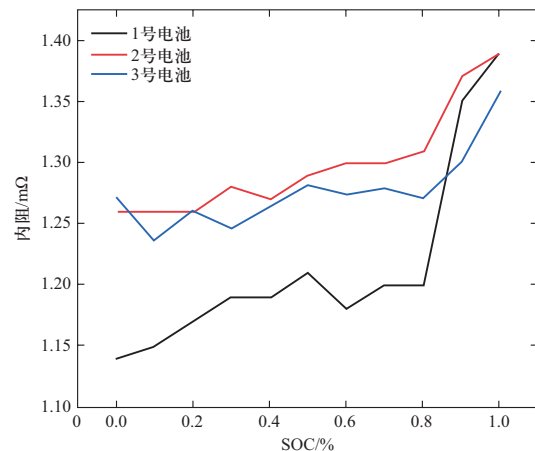


图7 并联单体的内阻情况

Fig. 7 Internal resistance of parallel cells

10%SOC采用HPPC脉冲实验辨识得到的内阻情况。充电开始时, 三只电池的SOC均为0%, 由于磷酸铁锂电池的充电特性, 三只电池的电压在初始阶段会迅速攀升, OCV差异较小, 因此支路电流差异较小。进入电压平台区后, 三只电池的内阻和极化参数存在差异, 因此支路电流差异逐步扩大, 同时支路电池的差异也进一步导致三只电池SOC及OCV的差异。到充电末期, 由于1号电池支路电流较大, 因此SOC较高, 率先脱离电压平台区, OCV上升较快, 接受电流能力下降, 导致1号电池的支路电流迅速下降, 与之对应的是2号、3号电池的支路电流会迅速上升, 如果不加控制, 极易导致支路电流超过电池的最大接受倍率, 引起过流。

表1 三并磷酸铁锂电池组充电情况

Table 1 The charging situation of the lithium iron phosphate battery pack

	1号单体	2号单体	3号单体
单体容量	60 Ah	60 Ah	60 Ah
并联容量	60.06 Ah	57.65 Ah	57.39 Ah
支路平均电流理论值	30 A	30 A	30 A
支路平均电流实际值	30.8 A	29.9 A	29.1 A

表1说明了并联的三只电池充电时各自充入的容量及支路平均电流情况, 每只电池充入的容量采用安时积分法获得。由表中的数据可以看出, 1号电池相比较2号电池多充入了2.41 Ah, 相比较3号电池多充入了2.67 Ah, 支路1的平均电流比理想状态下多0.8 A, 比支路3平均电流多1.7 A, 并且随着充电倍率的增大, 这种容量和支路电流的差异会继续扩大。所以当多只电池并联成组时, 如果采用较大倍率的电流充电, 极有可能导致某只电池的过充以及其他电池在充电末期的过流现象。

3.2 电池参数对支路电流的影响

在实际情况下, 并联成组的各个电池单体在内阻、SOC、容量等方面的不一致性导致了各支路电流的不平衡, 而支路电流的不平衡又进一步的加剧了电池组内的一致性, 使得电池组的性能变差。影响支路电流的各个因素之间往往相互作用, 互相关联, 仅通过实验探究单一因素对并联电池组的性能及支路电流的影响难度较大, 解耦复杂, 因此采用仿真模型

的方法, 控制变量, 从内阻、初始SOC、容量几个方面分析单一因素对并联电池组的性能及支路电流的影响。为了简化模型参数, 便于结果分析, 模型以三只磷酸铁锂电池并联为例。

3.2.1 内阻差异

如图8所示, 当并联电池仅内阻存在差异时, 支路电流的差异主要体现在电压平台区, 而到充电末期时, 由于内阻小的电池支路电流大, 在三只电池容量相同的情况下流经大电流的电池SOC更高, 更快的脱离电压平台区, OCV上升较快, 为了保证三只电池电压相同, 支路电流便迅速下降, 与之对应的另一只电池的电流会迅速上升, 并带来过流的安全隐患。

总而言之, 当仅有内阻存在差异时, 并联电池电压平台区的支路电流差异主要取决于内阻差异, 而充电末期则由于内阻、SOC、OCV等差异的累积导致支路电流差异的进一步扩大。

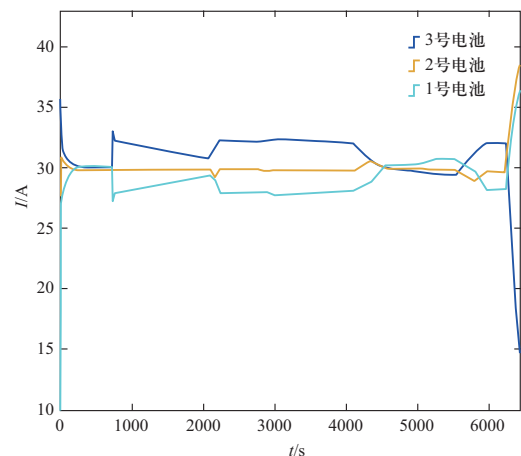


图8 内阻差异下的支路不平衡电流

Fig. 8 Branch unbalanced current under internal resistance difference

3.2.2 初始SOC差异

图9展示了1、2、3号电池的SOC分别为60%、50%和40%时的支路电流不平衡情况, 由此可以看出, 当初始SOC差异较大时, 并联支路电流一开始就有较大差异, 并且初始SOC差异越大, 支路电流差异越大, 主要是由于SOC较高的电池其对应的OCV也较高, 为了保持并联电池的电压一致, 支路电流便相应的降低。需要注意的是, 在充电末期, 由于SOC差异的持续累计, 支路电流差异迅速扩大, 支路电流的最大值可能超过电池的最大承受倍率, 带来安全隐患, 因此在实际情况下应避免SOC差异较大的电池直接并联成组。

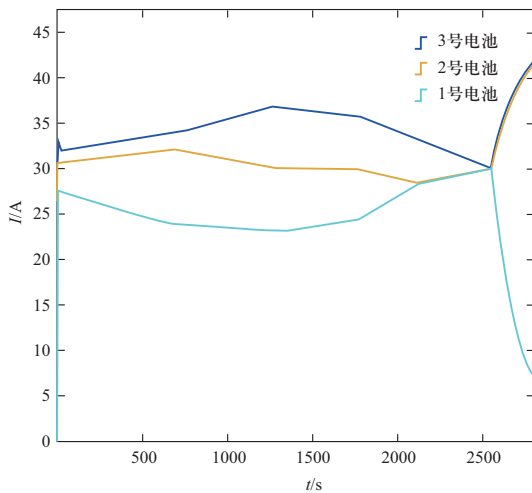


图9 初始SOC差异下的支路不平衡电流

Fig. 9 Branch unbalanced current under initial SOC difference

3.2.3 容量差异

图10为三只容量不同的电池并联的支路电流差异情况, 1、2、3号电池的容量分别为60 Ah、50 Ah、40 Ah。可以看出, 由于电池阻抗及初始SOC相同, 并联支路在初始时刻电流相同, 即相同时间内三只电池充入的电量相同, 但是三者的容量并不相同, 因此充入相同电量时对应的SOC并不相同, SOC差异使得三只电池的支路电流差异迅速扩大。之后进入电压平台区, 支路电流差异相比充电初始阶段的差异减小, 主要是由磷酸铁锂电池电压曲线的特性决定的。初始阶段的电压上升较快, 三只电池OCV差异明显, 到达电压平台区以后, 两只电池的电压差异相对初始阶段减少, 因此支路电流差异也相应减少。

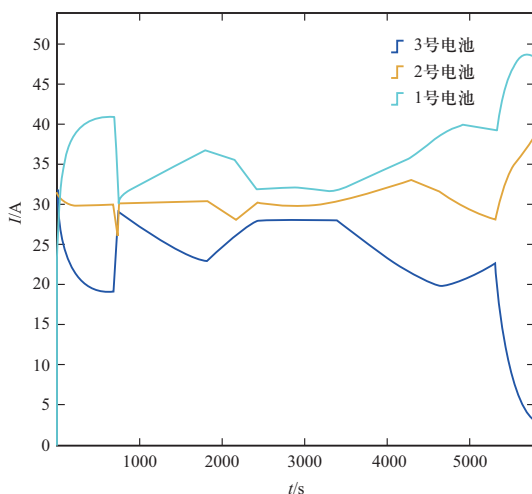


图10 容量差异下的支路不平衡电流

Fig. 10 Branch unbalanced current with capacity difference

4 结论

目前并联电池组的建模主要存在支路电流采集繁琐以及各个因素对支路电流的影响较难解耦等问题, 本文针对以上问题, 结合回路电流法和锂电池的状态方程建立了包含支路电流计算方法的并联仿真模型, 并通过搭建的并联电池组实验平台对仿真模型的准确度进行验证, 实验结果相对误差在3%以内, 模型简化了实际中并联电池模组对支路电流的检测环节。通过改变模型参数, 研究了电池内阻、容量、初始SOC等因素对并联支路不平衡电流的影响。结果表明:

1) 对于磷酸铁锂电池组而言, 当初始SOC和容量差距不大时, 充电起始阶段支路电流差异较小, 到达电压平台区后, 不平衡电流差异主要取决于内阻差异, 而充电末期的支路不平衡电流则主要取决于累积的SOC差异。

2) 当并联单体初始SOC和容量存在较大差异时, 充电起始阶段的支路电流即存在较大差异, 并且支路不平衡电流导致SOC差异逐渐扩大, 最终导致充电末期某支路电流可能超过电池的最大容许电流倍率, 带来安全隐患。

3) 对于新电池模组而言, 由于其初始SOC和容量几乎一致, 支路电流差异很小, 主要取决于单体内阻差异, 但随着电池的循环老化, 支路电流差异逐步扩大, 后期的支路电流差异主要由SOC差异导致。

该方法适用于对并联电池组的支路电流不平衡电流的分析, 并能够对并联电池组的合理设计及成组优化提供重要依据。

针对磷酸铁锂电池充放电曲线高低端变化速率较快导致模型误差偏大的问题可以通过增加两端HPPC实验的脉冲密度解决, 进一步提高模型的准确度也是继续研究方向之一。此外, 模型参数会根据电池的老化程度出现变化, 模型进一步考虑到老化程度对支路电流影响也是未来研究的重点。

参考文献

- [1] 靳一奇. 储能参与含新能源发电系统调峰配置方式综述[J]. 电子技术与软件工程, 2021(2): 220-222.
- [2] 牛倩倩. 基于负荷预测的微网储能系统削峰填谷控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [3] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 54-58.

- ZHANG Buhan, ZENG Jie, MAO Chengxiong, et al. Improvement of power quality and stability of wind farms connected to power grid by battery energy storage system[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 54-58(in Chinese).
- [4] 李建林, 梁忠豪, 李雅欣, 等. 锂电池储能系统建模发展现状及其数据驱动建模初步探讨[J]. 油气与新能源, 2021, 33(4): 75-81.
- LI Jianlin, LIANG Zhonghao, LI Yaxin, et al. Development status in modeling of the lithium battery energy storage system and preliminary exploration of its data-driven modeling[J]. Petroleum and New Energy, 2021, 33(4): 75-81(in Chinese).
- [5] 董喜乐, 张彩萍, 姜久春. 一种新型大规模梯次利用电池组建模仿真方法[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(3): 369-374.
- DONG Xile, ZHANG Caiping, JIANG Jiuchun. A new modeling and simulation method for large scale second-use battery pack[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(3): 369-374(in Chinese).
- [6] 时玮, 姜久春, 张维戈, 等. 磷酸铁锂电池并联充放电特性研究[J]. 高技术通讯, 2012, 22(2): 205-210.
- SHI Wei, JIANG Jiuchun, ZHANG Weige, et al. Research on charging and discharging characteristics of parallel connection for LiFePO₄ Li-ion batteries[J]. Chinese High Technology Letters, 2012, 22(2): 205-210(in Chinese).
- [7] KIM S W, LEE P Y, KIM J, et al. Comparative analysis of cell-to-cell voltage and internal parameters variation for the series/parallel battery pack[C]//2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia). Busan, Korea (South). IEEE: 2688-2693.
- [8] 余航, 张博望麒, 易美琪. 基于安时-电动势法的锂离子电池组状态估计研究[J]. 通信电源技术, 2019, 36(9): 74-76.
- YU Hang, ZHANG Bowangqi, YI Meiqi. State estimation of lithium ion batteries based on ampere time-electromotive force method[J]. Telecom Power Technology, 2019, 36(9): 74-76(in Chinese).
- [9] 唐传雨, 韩华春, 史明明, 等. 基于DEKF的储能电池系统SOC估计方法研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3): 7-14.
- TANG Chuanyu, HAN Huachun, SHI Mingming, et al. SOC estimation method of battery energy storage system for BMS test platform [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 7-14(in Chinese).
- [10] 范刘洋, 汪可友, 张宝群, 等. 考虑电池组不一致性的储能系统建模及仿真[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 110-115.
- FAN Liuyang, WANG Keyou, ZHANG Baoqun, et al. Modeling and simulation of battery energy storage system considering intrinsic inconsistency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 110-115(in Chinese).
- [11] 任碧莹, 孙佳, 孙向东, 等. 提高串联锂电池SOC在线估计快速性的简化二阶模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 111-118.
- REN Biying, SUN Jia, SUN Xiangdong, et al. A simplified second-order model for improving the speed of on-line state of charge estimation of series lithium-ion batteries[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 111-118(in Chinese).
- [12] 吴小慧, 张兴敢. 锂电池二阶RC等效电路模型参数辨识[J]. 南京大学学报(自然科学), 2020, 56(5): 754-761.
- WU Xiaohui, ZHANG Xinggan. Parameters identification of second order RC equivalent circuit model for lithium batteries[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2020, 56(5): 754-761(in Chinese).
- [13] 罗勇, 赵小帅, 祁朋伟, 等. 车用动力电池二阶RC建模及参数辨识[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(4): 738-744.
- LUO Yong, ZHAO Xiaoshuai, QI Pengwei, et al. Second-order RC modeling and parameter identification of electric vehicle power battery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(4): 738-744(in Chinese).
- [14] 陈昊, 吴长水, 敖国强. 锂离子电池二阶阻容等效电路模型参数辨识[J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(5): 46-50.
- CHEN Hao, WU Changshui, AO Guoqiang. Parameter identification of second-order RC equivalent circuit model of lithium-ion battery[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2020, 58(5): 46-50(in Chinese).
- [15] 曹丽鹏, 谢阳, 李玲玲, 等. 锂离子电池等效电路模型及参数辨识方法研究[J]. 电气时代, 2017(2): 85-87.
- [16] 班登芳, 郑燕萍, 昌诚程, 等. 磷酸铁锂电池迟滞特性的研究[J]. 电源技术, 2019, 43(7): 1121-1124.
- BAN Dengfang, ZHENG Yanping, CHANG Chengcheng, et al. Study on hysteresis characteristics of lithium iron phosphate battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(7): 1121-1124(in Chinese).

收稿日期: 2021-11-02; 修回日期: 2022-04-29。

作者简介:

王开让(1987), 男, 高级工程师, 研究方向为电化学储能建模、规模化储能应用。通信作者, E-mail: krwang798@qq.com。

邹乃鹏(1996), 男, 硕士, 研究方向为新能源技术, E-mail: 19121549@bjtu.edu.cn。



王开让

(责任编辑 张鹏)