

基于多 Agent 的锂电池主动均衡策略控制仿真研究

傅军栋, 陈浩杰, 孙翔, 华天亮, 刘深深, 刘珺

(华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 针对锂电池的荷电状态均衡管理问题, 提出一种基于多智能体的电池组荷电状态一致性均衡方案。首先, 将多智能体控制策略引入电池管理的下垂控制中, 实现了主动均衡电路拓扑下的自主均衡; 其次, 建立领航跟随者模型, 利用参数已知的虚拟智能体使各个荷电状态不一致的电池的状态向其靠近, 实现充放电模式下的荷电状态均衡; 最后, 对二阶多智能体荷电状态均衡控制策略进行仿真验证。实验结果表明, 相比一阶均衡控制策略, 自主均衡时间减少了 43.02%, 充电模式中均衡时间减少了 16.13%, 放电模式中均衡时间降低了 32.9%, 多智能体系统在电池的均衡管理中能够实现荷电状态的均衡, 有效的降低了锂电池荷电状态到达一致性的收敛时间。

关键词: 荷电状态; 电池管理系统; 主动均衡; 均衡控制策略; 多智能体

中图分类号: TP311/TP-315

文献标志码: A

Simulation of active equalization strategy control for lithium battery based on multi-Agent

FU Jundong, CHEN Haojie, SUN Xiang, HUA Tianliang, LIU Shenshen, LIU Jun

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: . Aiming at the problem of charging state balance management of lithium battery, a multi-agent based battery pack consistent charging state balance scheme was proposed. Firstly, the multi-agent control strategy is introduced into the sagging control of battery management, and the autonomous balancing under the active balancing circuit topology is realized. Secondly, the lead follower model is established, and the virtual agents with known parameters are used to make the state of each battery with inconsistent charge state close to it, so as to achieve the charge state balance in charge-discharge mode. Finally, simulation verification of the two-order multi-agent state load balancing control strategy is carried out. The experimental results show that, compared with the first-order balancing control strategy, the autonomous balancing time is reduced by 43%, the balancing time in charging mode is reduced by 16.13%, and the balancing time in discharge mode is reduced by 32.9%. The multi-agent system can achieve the balance of SOC in battery balancing management, effectively reducing the convergence time of SOC reaching the consistency of lithium battery.

Key words: State of charge; Battery management system; Active equilibrium; Equilibrium control strategy; multi-agent.

作为电能存储的载体，锂电池在循环寿命，重量能量密度比，放电效率，浮充寿命和后期维护等方面具有更大的优势，但是单节电池的容量或功率并不能满足中大型负载，因此在运用上多表现为串并联而成的电池组来满足负载的用电需求。

受限于制作工艺，每一节电池在存在个体性能差异，在使用过程中，电池内部环境存在放电不均匀的情况，如果在充、放电过程中没有很好地解决异常使用的问题，随着使用时间的增加，不同电池之间的性能差异将扩大，造成电池组循环寿命和放电效率急剧下降^[1]，所以电源管理系统（BMS, Battery Management System）中的电池均衡管理模块尤其重要^[2]，可以有效降低电池组内部的荷电状态（SOC, State Of Charge）不一致，提高循环使用寿命，对于实现电池的安全、健康运行具有重要意义^[3]。

在均衡控制策略的变量选择上，以 SOC 比电压作为均衡准则能更有效利用动力电池组的容量，更具有优势^[4]。刘胜崇等人采用模糊理论以 SOC 作为变量，解决了过度充放电造成的荷电状态不平衡导致的输出电压波动问题^[5]；虽然 SOC 作为均衡参数能保证控制精度，但是 SOC 值的预测存在估算精度问题^[6]。

传统均衡控制策略中，下垂控制及其变式作为多储能系统中的 SOC 均衡控制方案得到了最为广泛的应用，Guerrero 等人基于输出-阻抗虚环提出了基于下垂控制法的分层递阶控制^[7]；Olivares 等人对基于下垂控制、模型预测控制和多智能体系统的控制策略进行了概述，并将控制策略分为三个等级，认为其是未来控制的趋势^[8]；吕冬翔等人针对连续系统模型和离散系统模型进行研究，并通过理论分析说明分布式系统在能源均衡控制方面的可行性^[9]。将均衡控制策略和系统相结合是未来的研究方向，研究一种能够实现电池能量在线、快速均衡的均衡控制管理是保证电池组长期高效、健康工作的关键。

为此，本文将均衡拓扑和均衡策略通过电源管理系统进行结合，在提出一种基于 LC-L 的电池组均衡方法之后，将多智能体控制策略引入 BMS 的下垂控制管理中，设计了基于多智能体的动态平均一致性的荷电状态均衡控制算法并进行了验证，在系统完成均衡的基础上，相比传统的一阶多智能体均衡控制策略，通过领航者模式，提出

了二阶多智能体一致性均衡策略，在充、放电过程中使 SOC 初始值不同的电池实现荷电状态的一致，缩短了电池组达到荷电状态平衡的时间。

1 均衡控制管理

均衡管理技术极为重要，现有的电池均衡方法和策略均未能同时兼顾均衡效率、速度、成本和系统复杂度，从整体上看，均衡管理的目的是对电池组内单体电池的不一致性进行均衡，使其保持充放电的动态平衡。不同的电路拓扑结构和控制策略有不同的特点，将二者进行结合共同研究均衡管理，将 SOC 作为均衡一致性参考变量，减少均衡损耗、提高均衡速度和降低系统结构的复杂度对电池组进行主动均衡能有效提高均衡效率。

1.1 电池管理系统

电池管理系统（Battery Management System, BMS）是电池系统的核心组成部分^[10]，主要作用是监测电池组电压、电流和温度等重要参数，在数据分析后获取电池组的荷电状态和功率状态，通过控制电路中的电力电子器件保障系统安全运行。

1.2 下垂控制

在均衡电路中，电池的荷电状态通常以安时积分法进行估算，表达式如下所示，

$$SOC(t) = SOC_0 + K \frac{\int_{t_0}^t i_B dt}{Q_N} \times 100\% \quad (1)$$

其中 SOC_0 是电源的初始容量， i_B 为放电电流， Q_N 为电池额定容量， K 是与充放电相关的影响系数，其中包含温度影响下的系数 K_1 ，充放电转换因子 K_2 ，电源老化周期系数 K_3 ，充放电倍率影响系数 K_4 。且有：

$$K = K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \quad (2)$$

输出功率为 P_B ， u_B 为端电压，充放电倍率 C ，满足

$$P_B = i_B u_B \quad (3)$$

$$C = \frac{i_B}{Q_N} \quad (4)$$

电压下垂控制表达式为

$$u_{dc} = U_{dc} - k \cdot P_B \quad (5)$$

u_{dc} 为直流母线电压； U_{dc} 为直流母线电压参考值； k 为下垂系数，联立公式(1)和公式(3)，得到

$$SOC(t) = SOC_0 + K \frac{\int_{t_0}^t P_B dt}{Q_N u_B} \times 100\% \quad (6)$$

因为对上式两端求导，因为端电压的变化较小，视为常数，可得

$$SOC'(t) = -K \frac{P_B}{Q_N u_B} \quad (7)$$

代入公式(4)和公式(5)，有

$$SOC'(t) = -K \frac{U_{dc} - u_{dc}}{i_B u_B} \cdot k \cdot C \quad (8)$$

由上式可知，可以通过电池的充放电功率实现对 SOC 变化速率的动态调节，电池的功率变化越小， SOC 的变化速度越慢。而下垂控制中的电压大都控制在额定电压附近，所以储能荷电状态均衡及其变化速率主要受下垂系数 k 和充放电相关的影响系数 K 控制。

1.3 荷电状态估计

电池荷电状态作为判断电池使用周期的一个重要指标，是电池管理系统进行电池管理的主要依据。近年来，拓展卡尔曼滤波算法（EKF, Extended Kalman Filter）在电池的 SOC 估算中应用十分频繁。

根据下图所示的二阶 RC 戴维南等效电路。其中 E 为锂电池电动势， R_1 和 R_2 为极化内阻， R_3 为欧姆电阻， C_1 和 C_2 为极化电容，负载电压为 V ， I_1 和 I_2 为支路电流， I 为干路总电流。

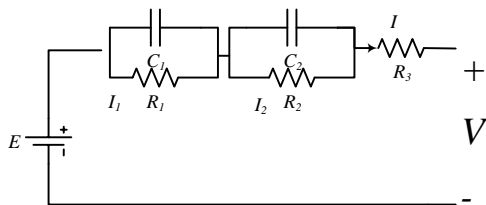


图1 二阶 RC 等效电路

Fig. 1 Davinan model of lithium battery

将等效电路模型带入 EKF 模型表达式中，求解出关于等效电池模型的状态空间矩阵模型：

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} SOC \\ U_{C_1} \\ U_{C_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-t/C_1 R_1} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-t/C_2 R_2} \end{bmatrix} \mathbf{x}(k) + \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} -\eta / Q \\ R_1(1 - e^{-t/C_1 R_1}) \\ R_2(1 - e^{-t/C_2 R_2}) \end{bmatrix} I(k) + \begin{bmatrix} W_{soc} \\ W_{U_{C_1}} \\ W_{U_{C_2}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = U(k) = E(k) - U_{C_1}(k) - U_{C_2}(k) - R_3 I(k) + V_K \quad (10)$$

1.4 均衡电路拓扑

传统均衡电路分为电感型均衡电路和电容型均衡电路，电感型均衡拓扑结构利用电感作为储能元件实现能量转移，其电路拓扑结构简单，设计实现较容易且可扩展性好，均衡速度较快，均衡效率高，可是相比之下均衡控制设计较复杂^[11]。电容型拓扑结构具有较少的储能器件数量，均衡结构较为简单，但当电池组中单节电池间能量差别很大时，具有能量转移所消耗的时间过长，均衡效率低等缺点^[12]。

单纯的电感和电容均衡电路都有缺点，目前均衡电路大都是电感-电容复合型电路。本文在基于 LC-L 储能的串联电池组主动均衡拓扑结构上加入均衡控制策略，多电池系统的均衡电路拓扑结构如下所示。

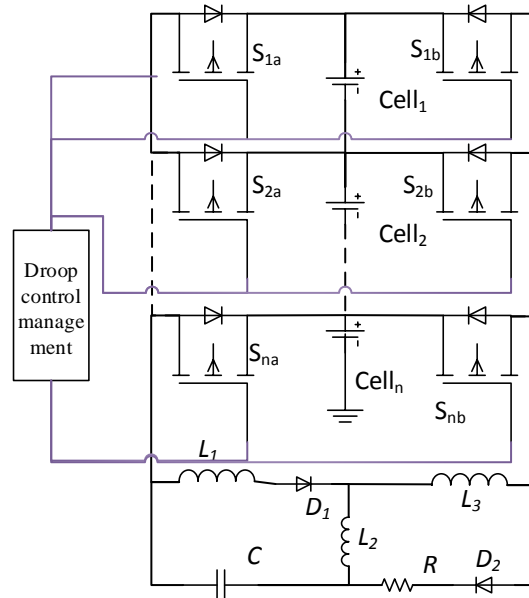


图2 LC-L 均衡电路拓扑

Fig 2 LC-L equalization circuit topology

在获得各个电池的荷电状态值后，电路拓扑将高 SOC 的电池单体的能量转移到电路中基础储能元件，通过储能器件提供续流回路，再将电能转移给 SOC 较低的电池单体，在电感电容谐振电路实现能量转移的同时，利用缓冲电路减小回路电流，改善阶梯效应，使得各个电池的荷电状态保持一致，为能量的可靠传递提供了保障。

2 多智能体模型

2.1 智能体荷电状态均衡

在多电池组成的多智能体系统中，每个智能体获得其余智能体的相关信息，通过上式中的 SOC

平均一致性动态算法更新自身信息并向拓扑图中相邻智能体发送自身的荷电状态估计值。

以图论的观点通过拉普拉斯来实现多智能体系统的设计^[13-14]，在多智能体系统中，智能体信息交流可用图 $G = \{A, E, V\}$ 表示，图中 N 个非空点集合表示为 $V = \{v_1, v_2, v_3, \Lambda, v_n\}$ ， E 表示智能体的集合边缘，邻接矩阵记作 A ，且 $A_{n \times n} = [a_{ij}]$ ，度

矩阵记作 D ，且 $D = \text{diag}\{d_1, d_2, \Lambda, d_n\}$ ，且

$d_j = \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij}$ 。图 G 的 Laplacian 矩阵记为 L ，且

$L = D - A$ 。智能体组成的非线性系统，动力学模型可表示为：

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = u_i(t) + f(t, x_i(t)) \\ u_i(t) = v_i(t) \end{cases} \quad (11)$$

其中 f 为非线性函数， $x_i(t)$ 是表示智能体的状态， $u_i(t)$ 是系统的控制输入， $v_i(t)$ 表示速度信息，在多智能体系统中将 $v_i(t)$ 作为系统的控制输入，其值与电池放电倍率 C 有关。

在智能体系统的均衡模式下^[15-16]，首先将每一节电池视作一个智能体，单位时间内的电流动态一致性更新公式如下所示，

$$\dot{\tilde{i}}_i^p(t) = \tilde{i}_i^p(t) + \frac{\rho_1}{|N_i|} \int_0^t [\tilde{i}_j^p(\tau) - \tilde{i}_i^p(\tau)] d\tau \quad (12)$$

其中 i_j^p 为输出电流和电池容量的比值， \tilde{i}_j^p 为智能体 i 所接收到智能体 j 的电流估计值，其中 ρ_1 为单位时间内电流状态的动态平衡系数^[17]， N_i 为无向图中与节点 i 相连的节点的集合，基于前时间序列数据预测电池 i 当前的荷电状态 $SOC_i(t)$ ，智能体 i 接收来自智能体 j 的荷电状态预测值 $SOC_j(t)$ ，同时将自身当前预测值 $SOC_i(t)$ 发送给 j ，通过 SOC 的动态平均一致性算法更新自身信

息，荷电状态预测值在多智能体一致性算法中的更新模式如下公式所示：

$$SOC_i^p(t) = SOC_i(t) + \frac{\rho_2}{|N_i|} \int_0^t [SOC_j(\tau) - SOC_i(\tau)] d\tau \quad (13)$$

其中 ρ_2 为单位时间内荷电状态动态平衡系数，

当 $t \rightarrow \infty$ 时 $SOC_i - SOC_j = 0$ ，即，所有智能体的荷电状态最后都趋于相同的值。

变换微分时域形式为：

$$s\tilde{SOC}_i^p(t) = \tilde{SOC}_i(t) + \frac{\rho_1}{|N_i|} [SOC_j(\tau) - d_i SOC_i(\tau)] \quad (14)$$

对上式进行拉氏变换，根据对应的智能体 i 和 j 的拓扑图引入 Laplacian 矩阵，向量表达式为：

$$s\tilde{SOC} - \tilde{SOC}(0) = sSOC^X - SOC^X(0) - \frac{\rho_1}{|N_i|} (SOC_i)L, \quad (15)$$

s 为拉普拉斯算子， \tilde{SOC} 为 \tilde{SOC}_i^p 的拉氏变换形态，表示智能体的平均值向量， $SOC^X = [SOC_1, SOC_2, \Lambda, SOC_N]^T$ 为智能体的荷电状态向量。其中电池的平均估计向量和电池荷电状态向量相等，即 $\tilde{SOC}(0) = SOC^X(0)$ ，最终得

到估计值 \tilde{SOC} 和测量值 SOC

$$s\tilde{SOC} = sSOC^X - \frac{\rho_1 SOC_i}{|N_i|} L \quad (16)$$

2.2 二阶智能体模型

考虑到二阶模型可以用来描述现实中更复杂的过程，人们开始将研究重点从一阶系统转向二阶系统的一致性。拓扑下有未知动态的非线性多智能体系统有限时间一致性在完整的多智能体系统中跟随者和领航者也应当满足完整的约束条件，下式是二阶多智能体系统里的一致性模型：

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t) + f(t, x_i(t)) \\ \dot{x}_i(t) = u_i(t) \end{cases} \quad (17)$$

与一阶模型相同， $x_i(t)$ 仍是表示智能体的状态，二阶模型中 $u_i(t)$ 表示智能体的控制输入信息，即放电倍率对时间的求导 i'_B ，可直接控制被

控对象的控制输入记作 a_i 。 α 、 β 分别为该系统的耦合强度，智能体的控制输入信息更新公式为，

$$u_i = -\sum_{j=1}^N a_j (\alpha(x_i(t) - x_j(t)) + \beta(v_i(t) - v_j(t))) \quad (18)$$

基于 LaSalle 不变性原理^[18]，在事件驱动控制配置下，网络拓扑结构中包含全局可达节点时，且满足入度平衡，多智能体系统可以渐进实现分组一致，对二阶多智能体控制系统，结合公式(12)和公式(13)，得到多能体系统的荷电状态更新公式为，

$$SOC_i^p(t) = L \cdot SOC_i(t) + a_i \cdot L \cdot v_i(t) \quad (19)$$

因为 $v_i(t)$ 与充放电倍率 C 相关^[19]，在二阶控制策略中，均衡系统的控制输入的公式满足：

$$v_i(t) = SOC_i^p(t-1) + i_B(t-1) \quad (20)$$

所以在二阶智能体的均衡控制模式下，系统通过单体的状态信息和改变放电倍率信息的二阶积分器模型改变 i_B 的变化范围从而降低系统到达均衡的时间。

2.3 领航者模型

但在实际应用过程中，锂电池的均衡管理不但要考虑到系统的自主均衡，还应考虑到充放电模式下的 SOC 均衡^[20-23]，在多智能体的基础上结合跟随领航者模型能在充放电时对荷电状态进行均衡^[21]，均衡系统跟随领航者模型的信息交流如下图 3 所示，

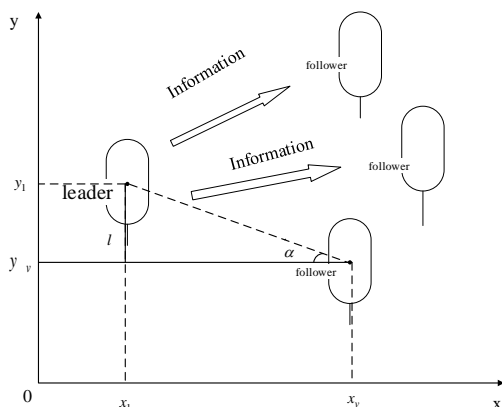


图 3 跟随领航者信息交流示意图

Fig.3 Schematic diagram of information exchange of following pilot

在整个系统中根据智能体最后需要到达的状态设置一个虚拟的领航者，其余的成员为跟随者。虚拟领航者的状态信息被智能体获得，则模型的

信息传递网络可以描述为 $G = (V_n, E)$ ，其中 V_n

代表各个智能体的顶点； $E \subseteq V_n \times V_n$ ，代表智能体之间的连接边。智能体 i 和它的邻接智能体 j 之间的信息交流用一个有向边表示。

本文把每个电池看作一个智能体，为了克服下垂控制对电压的影响，每个智能体使用本地信息和它的邻接智能体信息来更新本地的平均电压估计值。

每个智能体仅需要和邻接智能体进行信息交流，多智能体交流网络复杂程度大大降低，穿过智能体的平均电压(非特定电压)被用作末端控制，调节全局电压设定点。多智能体二级控制可表示为：

$$\dot{\bar{u}}_{ii(t)} = u_{ii(t)} + \frac{\beta}{|N_i|} \int_0^t \sum_{j \in N_i} (\bar{u}_{ij(\tau)} - \bar{u}_{ii(\tau)}) d\tau \quad (21)$$

上式中： $\bar{u}_{ii(t)}$ 为智能体 i 的本地估计平均电压； $u_{ii(t)}$ 为智能体 i 的输出母线电压； β 为平均电压一致收益； $|N_i|$ 为智能体 i 的邻接智能体的数目。在此控制协议下，最终实现：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\bar{u}_{ii} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_{ij}) = 0 \quad (22)$$

根据公式 18 可知，当智能体 i 的本地估计平均电压大于其邻接智能体的平均电压时，增加智能体 i 的邻接智能体的数目 $|N_i|$ ，使得 $\bar{u}_{ii(t)}$ 减小，可以缩小公式中 (22) 的电压均衡时间 t 。

由于模型中领航者参数值已知，并不断将信息传递给跟随者，跟随者向领航者的状态不断运动靠拢，最终就达成整个系统状态一致^[25]。跟随领航者模型的方式最大优点是直观、易于理解，但是缺点是在领航者被干扰或是参数不明的情况下会对整个系统的运行造成影响。

3 仿真模拟

下图是均衡控制管理系统中的均衡流程图，

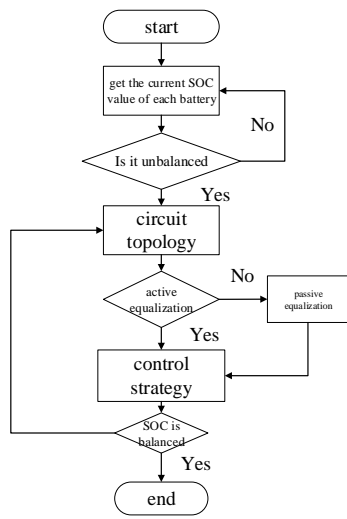


图 4 均衡流程图

Fig. 4 Equalization flow chart

为验证本文提出的基于多智能体 d 的荷电状态均

衡控制策略的有效性, 在 MATLAB/Simulink 仿真平台上搭建了电路仿真模型, 以荷电状态作为参考变量, 使其保持充放电的动态平衡。该仿真系统包含由 6 个电池构成的电池包, 为了使电池储能系统的荷电状态达到平衡, 根据系统中的各个电池的 SOC 调节每个电源的输出有功功率, 通过对 PI 控制器的不断修正解决电池单元容量和 SOC 不一致的问题, 最后通过电压电流双闭环控制器生成脉冲占空比, 并经过 PWM (Pulse Width Modulation) 生成器将占空比调制成接受的脉冲信号。信息传递网络中将对应电池相互连接从而构成一种链式结构, 且每个电池的初始容量不完全相同, 电路仿真模型如下图所示,

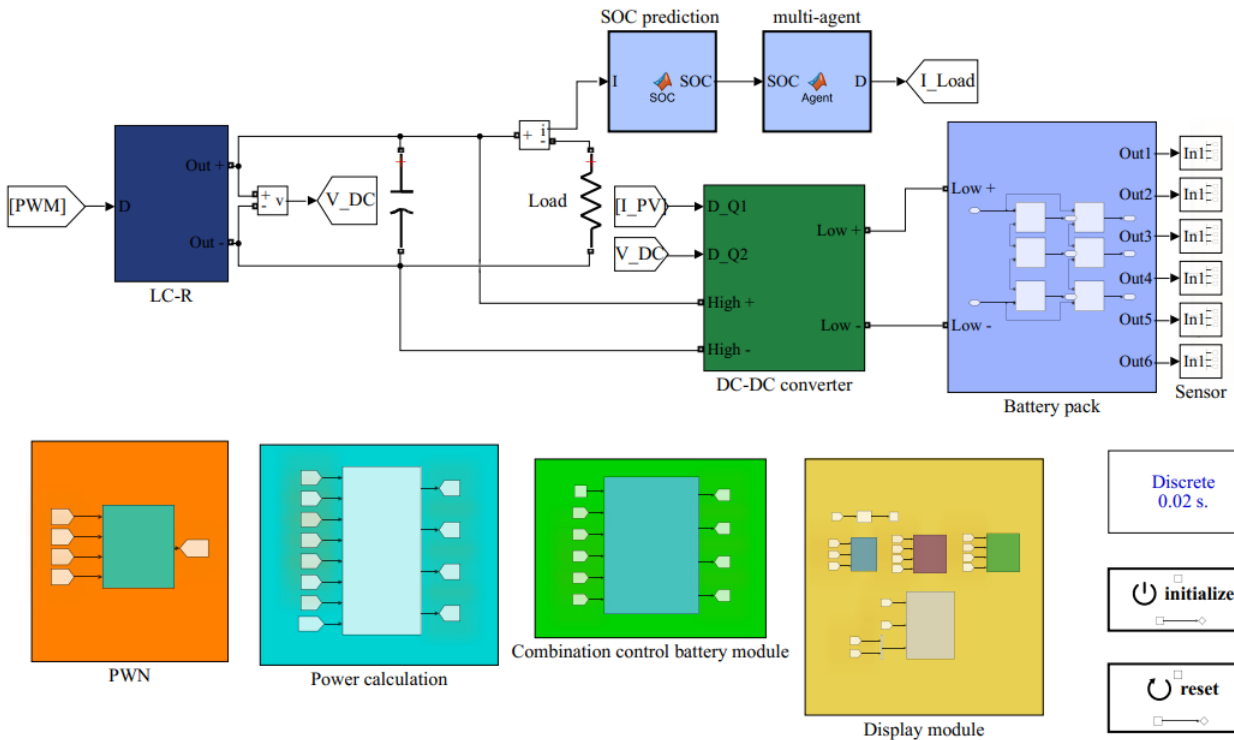


图 5 基于多智能体的 SOC 均衡策略的仿真模型

Fig.5 Simulation model of SOC equalization strategy based on multi-agent

在系统的自主均衡中, 不考虑领航者模型, 由 6 节电池组成的多智能体系统, 其使用的无向连接图同上图 5 所示, 在均衡开始时, 设定 6 个电池的初始荷电状态 $SOC(0)$ 分别为

[78.61%;49.23%;47.98%;42.22%;39.91%;35.69], 动态一致性参数 $\rho_1 = 1.1$, $f(t, x_i(t)) = 0.01 \times x_i(t)$ 时间周期的步长 $t = 0.1$, 为了使智能体系统的 SOC 达到平衡, 通过外电路的均衡拓扑结构调节每个

电源的有功功率。图 6 为多智能体间荷电状态均衡控制 SOC 均衡轨迹变化图，图 7 为 SOC 均衡下功率控制的速度，其为荷电状态与时间的比值，其中正值代表充电下的 SOC 增长速度，负值为放电下的 SOC 减少速度

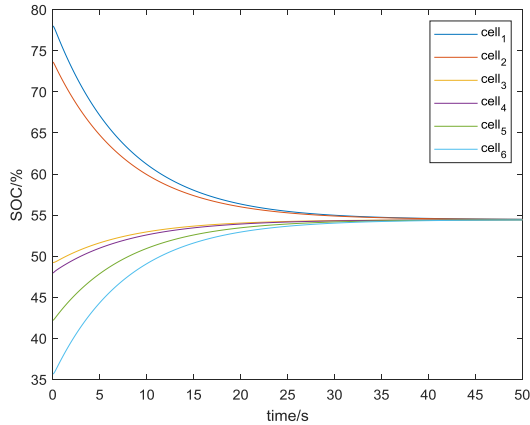


图 6 一阶多智能体 SOC 均衡轨迹变化图

Fig.6 SOC equilibrium trajectory change diagram of first-order multi-agent

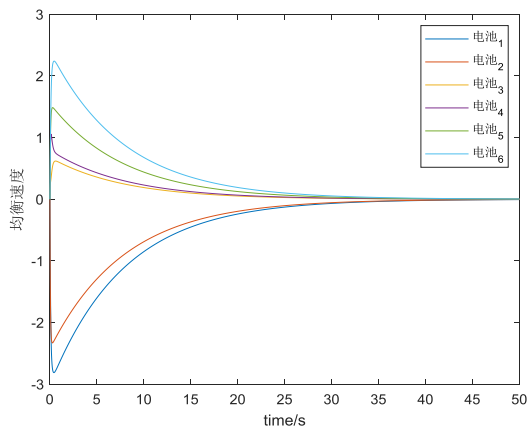


图 7 一阶多智能体 SOC 充放电速度变化

Fig.7 SOC charging and discharging speed change of first-order multi-agent

由上图可知，随着每个电池的自主均衡控制功率的速率降低，荷电状态均衡的速率在加快，电池之间的荷电状态差值慢慢缩小，初始 6 个智能体间的 $soc(0)$ 平均值为 54.55%，在均衡控制 $t=43s$ 时，6 个智能体的荷电状态值逐渐收敛并最终在 54.44% 处达成自主均衡。对充放电模式下的均衡，本文设计由一个参数已知的虚拟领航者作为主智能体和 N 个跟随者构成的多智能体系统，下图所示为跟随领航者控制模型的无向网络拓扑图。

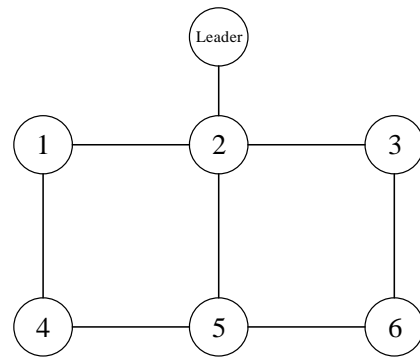


图 8 具有领航者的无向图网络拓扑图

Fig. 8 Undirected topology with pilot

以充电模式中的荷电状态均衡为例，建立由“1+6”节锂电池组成多智能体系统，系统中最后电池组内电池都需要到达的 SOC 值为 80%，则其中虚拟领航者的值设为 80%，不需要接收其他节点中智能体的信息，剩余 6 节全为跟随者，以下垂控制法对智能体实施均衡，图 9 是充电模式下的 SOC 均衡趋势变化图，图 10 是放电模式下 SOC 均衡趋势变化图

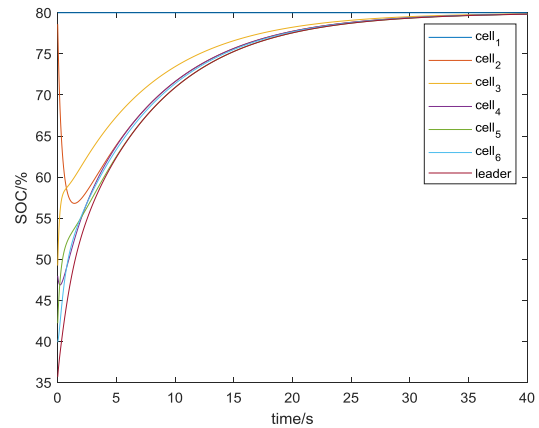


图 9 充电模式下的 SOC 均衡趋势变化图

Fig. 9 SOC equilibrium trend change in charging mode

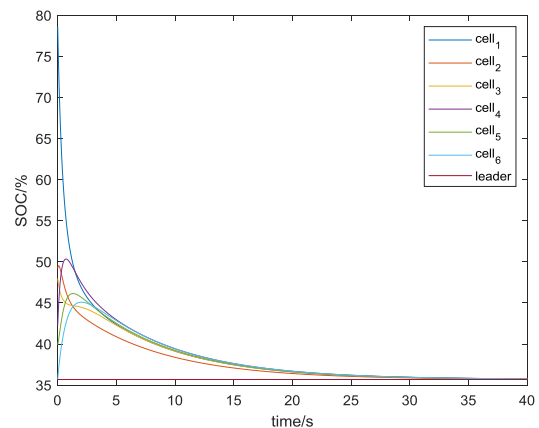


图 10 放电模式下的 SOC 均衡趋势变化图

Fig. 10 SOC equilibrium trend change in discharge mode

结果显示,一阶多智能体均衡系统中,将荷电状态 80% 的虚拟智能体设置为领航者后,在充电模式下,6 个初始荷电状态不一致的智能体跟随领航者进行充电均衡,当充电时间为 $t=39.75$ 时,到达平衡;放电模式下,当放电时间为 $t=32.5$ 时,实现了电池组放电下荷电状态的均衡。图 11 为自主均衡模式下二阶 SOC 均衡图,

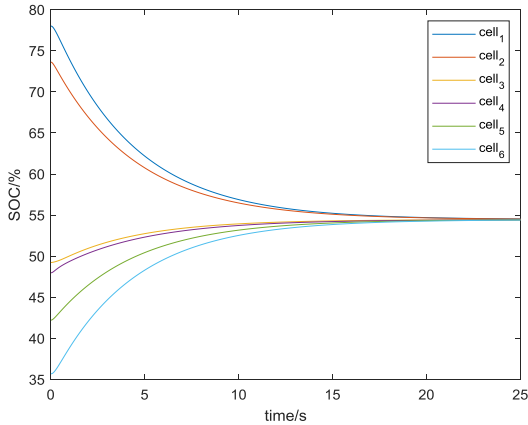


图 11 自主均衡模式下二阶 SOC 均衡图

Fig.11 Second order SOC equalization diagram in autonomous equalization mode

由图可知,二阶下的自主均衡在时间 24.5s 的时候 SOC 达成一致,设置初始充电功率速度为 $v=[0.5;0;0;0;0;0]$,根据提供的数据,采样时间 $t=0.01$,同时选取二阶加权参数 a_i 为 4.5。对虚拟领航者设置 SOC 充电恒定速度 v_0 为 0.5,不同于充电模式,初始放电功率速度 $v=[0;0;0;0;0;0]$,对虚拟领航者设置荷电状态放电控制速度 v_0 为 0。图 12 为充电模式下二阶跟随领航者 SOC 均衡图,图 13 为放电模式下二阶跟随领航者 SOC 均衡图,

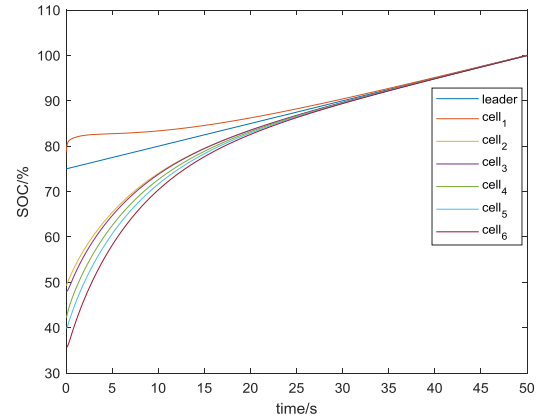


图 12 充电模式二阶跟随领航者 SOC 均衡图

Fig. 12 SOC equalization diagram of second-order follower pilot in charging mode

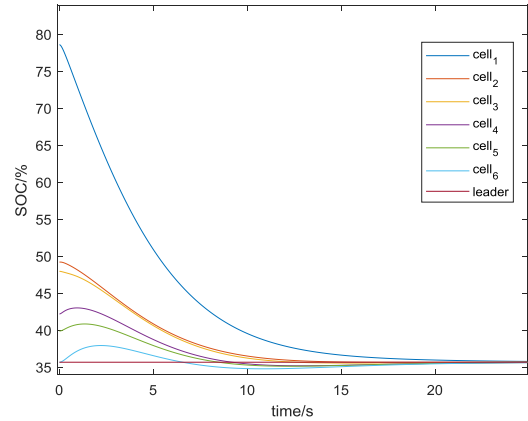


图 13 放电模式二阶跟随领航者 SOC 均衡图

Fig. 13 SOC equalization diagram of second-order follower pilot in discharge mode

结果显示,充电模式中设置荷电状态 75% 的虚拟智能体为领航者后,6 个跟随智能体的荷电状态逐渐趋同于领航者,相比一阶智能体均衡系统,二阶系统在锂电池组实现均衡时,时间 $t=33.34$,均衡时间大大提前,到达平衡时,6 节电池的 SOC 均为 82.8%,实现了多电池充电下 SOC 的均衡,荷电状态的最大差异从 42.92% 成功降至 0。

放电模式中设置荷电状态 35.69% 的虚拟智能体为领航者后,6 个跟随智能体的荷电状态逐渐趋同于领航者,二阶系统在电池放电模式实现均衡时,时间 $t=21.8$,实现了多电池充电下 SOC 的均衡。综上,下表为同一均衡电路拓扑结构下不同控制策略的均衡结果,

表 1 控制均衡效果

Table 1 Control equalization effect

Control strategy	Working condition	Maximum deviation/%	End SOC value/%	time/s
Traditional balanced control strategy	Automatic mode	42.92	54.44%	202
	Charging mode	42.92	82.8%	79.2
	Discharge mode	42.92	35.69%	86.7
First-order equilibrium strategy	Automatic mode	42.92	54.44%	43
	Charging mode	42.92	79.83%	39.75
	Discharge mode	42.92	35.69%	32.5
Second-order equalization strategy	Automatic mode	42.92	54.44%	24.5
	Charging mode	42.92	82.8%	33.34
	Discharge mode	42.92	35.69%	21.8

4 结论

本文对均衡电路拓扑下基于多智能体均衡一致性方法对锂电池荷电状态均衡管理进行探讨, 将均衡控制策略与均衡电路拓扑结合, 并进行均衡控制仿真验证。实现多智能体下的自主均衡控制后, 引入领航跟随者模型, 实现在充放电模式下的 SOC 均衡控制, 其均衡时间分别为 39.75 和 32.5s。并在一阶控制策略的基础上进一步使用二阶均衡控制策略, 与一阶控制策略相比, 二阶控制策略。自主均衡时间减少了 43.02%, 充电模式中均衡时间减少了 16.13%, 放电模式中均衡时间降低了 32.9%, 使其 SOC 均衡曲线更加平滑, 减少了锂电池 SOC 一致性收敛时间, 保证电池组长期高效、健康工作。

但是本文对电池荷电状态的均衡未考虑到电池老化对电池充放电性能的影响, 仿真中未对电池在使用过程中最大容量的衰减进行模拟, 未来需要引入电池的健康状态评判标准, 实现老化周期内的多电池均衡控制。

参考文献:

- [1] Hua Y, Zhou S, Cui H, et al. A comprehensive review on inconsistency and equalization technology of lithium-ion battery for electric vehicles[J]. International journal of energy research, 2020(14):44.
- [2] 张婕, 曾国辉, 赵晋斌, 等. 基于改进冒泡排序的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(06): 92-99. Zhang Jie, Zeng Guohui, Zhao Jinbin, et al. Capacitive voltage Balancing Strategy for Modular Multilevel Converter Based on Improved bubble Sequencing [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(06): 92-99.
- [3] Ghaeminezhad N, Ouyang Q, Hu X, et al. Active Cell Equalization Topologies Analysis for Battery Packs: A Systematic Review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, PP(99):1-1.
- [4] Zhang X, Yan G. Estimating SOC and SOH of lithium battery based on nano material[J]. Ferroelectrics, 2021(580-):580.
- [5] 刘胜崇, 帕孜来·马合木提, 葛震君. 基于模糊控制的蓄电池系统储能单元 SOC 均衡方法[J]. 现代电子技术, 2020, 43(24): 135-139. Liu Shengchong, Pasilai Ma Hemuti, Ge Zhenjun. Fuzzy control based SOC equalization method for battery energy storage unit [J]. Modern Electronic Technique, 2020, 43(24): 135-139.
- [6] Naseri F, Schaltz E, Stroe D-I, et al. An Enhanced Equivalent Circuit Model With Real-Time Parameter Identification for Battery State-of-Charge Estimation[J]. Ieee Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(4): 3743-3751.
- [7] 张凯, 赵鹏, 王友仁, 等. 基于荷电状态的锂离子电池组主动均衡控制[J]. 中国机械工程, 2020, 31(16): 1931-1939. Zhang Kai, Zhao Peng, Wang Youren, et al. Active Equalization Control of Lithium Ion Battery Pack Based on State of Charge. China Mechanical Engineering, 2020, 31(16): 1931-1939.
- [8] Olivares D E, Mehrizi-Sani A, Etemadi A H, et al. Trends in Microgrid Control[J]. Ieee Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1905-1919.
- [9] 吕冬翔, 张志成, 朱立宏, et al. 基于多智能体的太阳能无人机能源控制研究[J]. 控制与决策: 1-7. Lv DONGxiang, ZHANG Zhicheng, ZHU Lihong, et al. Research on energy control of solar uav based on multi-agent [J]. Control and decision making: 1-7.

- [10] Guerrero J M , Vasquez J C , Matas J , et al. Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1):158-172.
- [11] Morstyn T , Savkin A , Hredzak B , et al. Multi-Agent Sliding Mode Control for State of Charge Balancing Between Battery Energy Storage Systems Distributed in a DC Microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017:1-1.
- [12] 傅军栋,陈康,黄扬海. 基于 Agent 的变电站通信研究[J]. 华东交通大学学报,2020,37(03)
Fu Jundong, Chen Kang, Huang Yanghai. Research on Substation Communication Based on Agent [J]. Journal of East China Jiaotong University ,20,37(03)
- [13] 张赟,王琛,王毅,等. 基于自适应下垂控制的直流微电网多储能 SOC 动态均衡策略[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2020, 47(05): 21-29.
Zhang Yun, Wang Chen, Wang Yi, et al. Dynamic Balancing strategy for Multi-energy Storage SOC in DC microgrid based on Adaptive droop Control [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2020, 47(05): 21-29.
- [14] 卢艳琴,周仁友,黄天翔,等. 基于改进下垂控制的并网级联型储能系统 SOC 均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 120-129.
Hu Yanqin, Zhou Renyou, Huang Tianxiang, et al. SOC balancing strategy of a grid-connected cascaded-type energy storage system [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 120-129.
- [15] 李建林,李雅欣,黄碧斌,等. 退役动力电池一致性评估及均衡策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 1-7.
Li Jianlin, Li Yaxin, Huang Bibin, et al. Research on consistency evaluation and control strategy of a retired power battery [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 1-7.
- [16] Gozdur R , Przerzywacz T , D Bogdański. Low Power Modular Battery Management System with a Wireless Communication Interface[J]. Energies, 2021, 14.
- [17] Kirad K , Chaudhari M . Design of cell spacing in lithium-ion battery module for improvement in cooling performance of the battery thermal management system[J]. Journal of Power Sources, 2021, 481:229016.
- [18] 李斌,郭亮,刘双华,等. 无线抬动监测装置电源管理关键技术研究[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(03): 150-154.
Li Bin, Guo Liang, Liu Shuanghua, et al. Key Technology research on Power Supply management of Wireless Lift Monitoring Device [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(03): 150-154.
- [19] 程潇,彭春华,陈思畏.含需求响应综合能源系统的强化学习优化调度 [J/OL]. 华东交通大学学报 :1-8[2023-04-11].<https://doi.org/10.16749/j.cnki.jecjtu.20230330.005>.
Cheng Xiao, Peng Chunhua, Chen Siwei. Optimal Scheduling of Reinforcement Learning for Integrated Energy Systems with Demand Response [J/OL]. J Journal of East China Jiaotong University: 1-8 [2023-04-11].<https://doi.org/10.16749/j.cnki.jecjtu.20230330.005>.
- [20] 张元星,李斌,颜湘武,等. 基于电池模型的电动汽车充电故障监测与预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 143-154.
Zhang Yuanxin, Li Bin, Yan Xiangwu, et al. Electric Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 143-154.
- [21] Lin Y , Xu X , Wang F , et al. Active equalization control strategy of Li - ion battery based on state of charge estimation of an electrochemical - thermal coupling model[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(5).
- [22] 傅军栋,陈浩杰,孙翔,等. 基于 EKF-Markov 的 UPS 荷电状态预测与健康管理系统[J]. 电源学报.: 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20220506.1248.004.html>
Fu Jundong, Chen Haojie, Sun Xiang, et al. UPS state prediction and Health Management System based on EKF-Markov [J]. Journal of Power Sources.: 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20220506.1248.004.html>
- [23] Yang S , Ma S , Guan S , et al. Design on High Voltage Generation and Surge Suppression of AGPS for CFETR N-NBI prototype[C]// International Electrical and Energy Conference. IEEE, 2021.
- [24] 李中奇,王睿.重载列车多智能体模型的鲁棒一致性控制方法 [J/OL]. 控制与决策:1-9[2023-03-03].DOI:10.13195/j.kzyjc.2022.0405.
Li Zhongqi, Wang Rui. Heavy-duty train multi-agent

model robust consistency control method [J/OL]. Control and decision: 1-9 [2023-03-03]. DOI: 10.13195 / j.k. zycj. 2022.0405.

[25] Chen H, Li S, Wu S. Hybrid Energy Storage Module in Photovoltaic Power Generation System for Brushless DC Motor Operation[J]. SENSORS AND MATERIALS. 2022, 34(2): 871-884.

[26] Kirad K , Chaudhari M . Design of cell spacing in lithium-ion battery module for improvement in cooling performance of the battery thermal management system[J]. Journal of Power Sources, 2021, 481:229016.

作者简介



第一作者：傅军栋（1972-），男，副教授，研究方向为电力系统、智能建筑。E-mail: 8755915@qq.com。