

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240619

基于一致性算法的锂电池组内单体锂电池 SOH 主动均衡方案

吴青峰¹, 杨凯义¹, 刘立群¹, 朱彦军¹, 薄利明², 杨杰豹³

(1. 太原科技大学电子信息工程学院, 山西 太原 030024; 2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001;
3. 山西工程技术学院电气与控制工程系, 山西 阳泉 045000)

摘要: 针对现存锂电池组内串联单体锂电池健康状态(state of health, SOH)均衡方案需要集中控制器和全局通信、系统建设成本居高不下等问题, 提出一种基于一致性算法的锂电池组内单体锂电池 SOH 主动均衡方案。分析了 SOH 参数、放电深度(depth of discharge, DOD)和有功功率三者之间的内在联系, 设计了有功功率分配和控制算法切换法则。利用一致性算法求解 DOD 平均值, 以达到在无需集中控制器和减少通信信号数量的前提下, 实现锂电池组内单体锂电池 SOH 均衡的控制目标, 提高锂电池容量利用率, 降低锂电池维护成本。最后, Matlab/Simulink 仿真结果说明, 所提方案在负荷变化、通信中断、锂电池块数增加和 DOD 出现测量误差的情况下, 均能使锂电池组内串联单体锂电池 SOH 自均衡。

关键词: 锂电池; 功率控制; 主动均衡; 健康状态; 放电深度; 一致性算法

An active SOH balancing scheme based on a consensus algorithm for individual

lithium-ion cells in a battery packs

WU Qingfeng¹, YANG Kaiyi¹, LIU Liquan¹, ZHU Yanjun¹, BO Liming², YANG Jiebao³

(1. College of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China; 3. Department of Electrical and Control Engineering, Shanxi University of Engineering and Technology, Yangquan 045000, China)

Abstract: To address the limitations of existing state of health (SOH) balancing strategies for series-connected lithium-ion cells, such as the need for a centralized controller, extensive global communication, and high system costs, this paper proposes an active SOH balancing strategy based on a consensus algorithm. The intrinsic relationship among SOH parameters, depth of discharge (DOD), and active power is analyzed, and an active power allocation and control algorithm switching rules are designed. A consensus algorithm is used to solve the average value of DOD, achieving SOH balancing without requiring a centralized controller and reducing communication signal requirements. This approach enhances battery capacity utilization efficiency and lowers maintenance costs. Finally, Matlab/Simulink simulations demonstrate that the proposed scheme can achieve self-balancing of SOH within a series-connected lithium-ion battery pack, even with load variations, communication interruptions, increasing number of battery cells, and DOD measurement errors.

This work is supported by the General Program of Basic Research Technology of Shanxi Province (No. 202203021221153).

Key words: lithium-ion battery; power control; active balancing; state of health; depth of discharge; consensus algorithm

0 引言

为实现全国经济绿色可持续发展, 降低温室效

基金项目: 山西省基础研究技术面上项目资助(202203021221153); 阳泉市应用基础研究计划项目资助(2022JH059)

应, 中国提出了“双碳”目标^[1]。发展以风机、光伏等低碳发电装置为核心的微电网和以电池作为动力的电动汽车, 是实现“双碳”目标的重要手段。锂电池具有能量密度高、自放电小、循环寿命长等优点, 是微电网和电动汽车正常运行的关键^[2-3]。锂电池需要配备电池管理系统(battery management system, BMS)以实现锂电池充放电过程中的状态监控和能

量管理^[4-6]。健康状态(state of health, SOH)是表征锂电池性能和老化状态的指标,其是否均衡关系到锂电池组内单体锂电池能否同时达到报废标准^[7-8]。锂电池制造工艺、工作环境、充放电次数差异造成了锂电池初始 SOH 值不一致。若不采取合理的控制方案,锂电池组内串联单体锂电池在放电过程中无法自均衡 SOH,致使锂电池组内单体锂电池无法同时报废,造成资源浪费并增加维护成本^[9]。此外,SOH 不均衡还会造成 SOH 值较低的锂电池过度充放电,进而导致锂电池故障或发生火灾^[10]。因此,亟须对锂电池组内串联单体锂电池 SOH 均衡问题展开研究。

现有锂电池组内多单体锂电池主动均衡技术主要对荷电状态(state of charge, SOC)指标进行均衡。文献[11]提出一种锂电池组双层 SOC 均衡拓扑电路,利用模糊控制算法对 PID 参数进行调节,缩短了均衡时间,提高了均衡效率。文献[12]提出一种开关管复用的电感型串联锂电池组 SOC 均衡电路,均衡电路采取奇偶交错均衡策略,提高了均衡速度和效率。文献[13]提出一种直流链式储能的电池簇控制参数自适应 SOC 均衡控制策略,提高了 SOC 均衡效率。虽然文献[11-13]中的方案可均衡 SOC 参数,但文献[14]中验证了由于 SOC 的含义和影响因子与 SOH 参数不同, SOC 均衡方案均难以实现 SOH 参数均衡。

鉴于 SOH 均衡技术对锂电池的重要性,已有学者针对此研究方向展开攻关,并提出一些解决方案。在主动均衡方面,文献[15]通过控制 DC-DC 变换器可使 SOH 值高的锂电池比 SOH 值低的锂电池有更多的充放电循环次数,进而实现两块串联单体锂电池 SOH 均衡。文献[16]提出一种基于电池健康度的微电网梯次利用储能系统容量配置方法,根据 SOH 设置动态安全裕度,延长微电网群储能系统的服役寿命。文献[17]提出一种基于博弈论的 SOH 均衡方法,该方案可以根据当前 SOH 和预期 SOH 调整锂电池放电深度(depth of discharge, DOD)值,进而实现电池 SOH 均衡的目标。文献[18]提出一种电池模块化多电平(battery integrated modular multilevel converter, B-MMC)系统的多层锂电池 SOH 均衡方案,解决了每个子模块组间和组内电池不均衡问题,但该方案只适用于 B-MMC 系统。文献[15-18]中的 SOH 主动均衡方案均需集中控制器和全局通信,成本较高,计算复杂,当集中控制器或通信出现故障时易造成控制失效。针对此问题,文献[19]利用多代理技术调节锂电池组间的能量流动,进而均衡 SOH。该方案无需集中控制器,通信信号数量少,但该方案针对微电网分布式锂电池组系统,控制对象为逆变器,

其均衡方案难以适用于通过 DC-DC 变换器串联的锂电池组内多单体锂电池系统。

综上所述,现存锂电池 SOH 主动均衡方案存在需要集中控制器、通信信号数量多的问题,而通信信号数量少的 SOH 均衡方案只适用于分布式锂电池组系统。针对此问题,本文提出一种基于一致性算法的锂电池组内单体锂电池 SOH 主动均衡方案,研究了 SOH 调节法则,通过 DOD 参数来调节 DC-DC 变换器的输出电压,进而调节锂电池有功功率的分配,最终实现锂电池组内多块串联单体锂电池 SOH 均衡。在所提方案中引入一致性算法,得到有功功率的调节因子 $\beta_{DOD,av}$,可在无集中控制器和减少通信信号数量的前提下实现预定控制目标。

1 锂电池组内单体锂电池主动均衡拓扑结构

锂电池组内单体锂电池主动均衡拓扑结构如图 1 所示。图 1 中: I_n 为锂电池 n 的充放电电流; U_{Bn} 为锂电池 n 的输出电压; U_{DCn} 为锂电池 n DC-DC 变换器的输出电压; U_{BP} 为整个锂电池组的输出电压; P_n 为锂电池 n DC-DC 变换器输出的有功功率; I_{load} 为负荷上流过的电流; M_{modn} 为锂电池 n DC-DC 变换器的调制信号; $\gamma_{SOH,n}$ 为锂电池 n 的 SOH 值。BMS 根据各块单体锂电池的 SOH 信息和所提 SOH 均衡算法调整 DC-DC 变换器的工作状态,进行影响单体锂电池间的能量流动,最终使各块单体锂电池 SOH 值趋于一致。

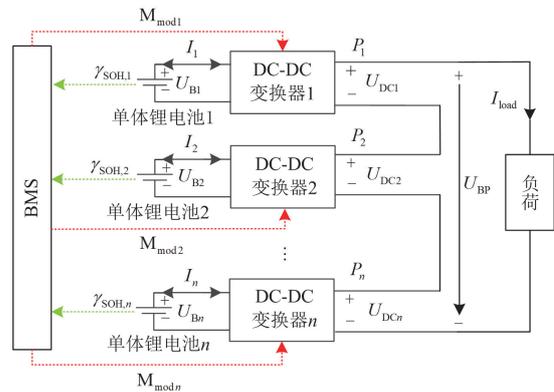


图 1 锂电池组内单体锂电池主动均衡拓扑结构

Fig. 1 Active balancing topology of individual lithium batteries within a lithium battery pack

2 锂电池的 SOH 估算

要实现锂电池的 SOH 均衡控制,首先要测量锂电池的 SOH 值。由于 SOH 指标反映的是锂电池的内部状态,无法实现直接测量,因此需要对锂电池的 SOH 值进行估算。由于锂电池为非线性系统,需

要对其建模, 以测量电气参数并进行 SOH 估算。本文采用图 2 所示的锂电池 Thevenin 等效电路模型^[20]。图 2 中: U_{oc} 为开路电压; R_o 为欧姆内阻; R_p 为极化电阻; C_p 为极化电容; U_L 为电池与外电路接通后的闭路电压。

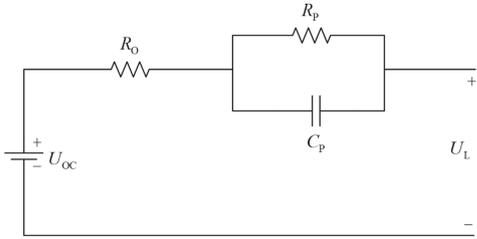


图 2 锂电池 Thevenin 等效电路模型

Fig. 2 Thevenin equivalent circuit model of lithium battery

目前主流的 SOH 估算方法有基于容量^[21]和基于内阻^[22]的方法, 其表达式分别如式(1)和式(2)所示。

$$\gamma_{SOH} = \frac{Q_{max}}{Q_{rated}} \quad (1)$$

$$\gamma_{SOH} = \frac{R_E - R_C}{R_E - R_N} \quad (2)$$

式中: γ_{SOH} 为锂电池的 SOH 值; Q_{max} 为锂电池当前状态下可释放的最大容量; Q_{rated} 为锂电池的标称容量; R_E 为锂电池报废时的内阻; R_C 为锂电池的当前内阻; R_N 为锂电池的标称内阻。

虽然上述两种方法使用广泛, 但式(1)的时间成本较高, 式(2)对环境温度非常敏感。因此, 文献[23]提出用生命周期增量与容量退化之间的关系来定义锂电池的 SOH, 其表达式为

$$\gamma_{SOH} = \frac{C_{left}}{C_{total}} = \gamma_{SOH(0)} - \frac{C_{acu}}{C_{total}} \quad (3)$$

式中: C_{left} 为锂电池生命周期结束前剩余的生命周期数; C_{total} 为锂电池的总生命周期数; C_{acu} 为锂电池的累积生命周期数; $\gamma_{SOH(0)}$ 为锂电池的初始 SOH 值。

锂电池放电深度 β_{DOD} 与锂电池的总生命周期 C_{total} 之间的关系为

$$C_{total} = a \cdot (\beta_{DOD})^{-b} \quad (4)$$

式中, a 、 b 为锂电池拟合系数, 可从电池单元的退化拟合曲线获得。

由式(3)和式(4)可推导出 β_{DOD} 和 γ_{SOH} 之间的关系, 如式(5)所示。

$$\gamma_{SOH} = \gamma_{SOH(0)} - \frac{C_{acu}}{a \cdot (\beta_{DOD})^{-b}} \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 由于 $\gamma_{SOH(0)}$ 和 C_{acu} 由锂电池

本身特性决定, 不可调控, 因此调节 β_{DOD} 的值成为均衡 SOH 的关键。

β_{DOD} 可以用相对 SOH 值进行表示, 如式(6)所示。

$$\beta_{DOD} = (\gamma_{SOH^\Delta})^{\frac{1}{x}} \cdot \beta_{DOD,max} \quad (6)$$

式中: γ_{SOH^Δ} 为锂电池的相对 SOH 值; x 为比例系数; $\beta_{DOD,max}$ 为所有 β_{DOD} 中的最大值。

γ_{SOH^Δ} 的计算公式为

$$\gamma_{SOH^\Delta} = \frac{\mu_{ASOC,min}}{\mu_{ASOC}} \quad (7)$$

式中: μ_{ASOC} 为锂电池的 SOC 变化率; $\mu_{ASOC,min}$ 为 μ_{ASOC} 中的最小值, 它是一个定值。

μ_{ASOC} 的表达式为

$$\mu_{ASOC} = \frac{\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} Idt}{Q} = \frac{\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} Pdt}{Q \cdot U_B} \quad (8)$$

式中: Q 为锂电池的实际容量; I 为锂电池的输出电流; P 为锂电池输出的有功功率; U_B 为锂电池的输出电压; t_1 为锂电池输出电流采集的初始时刻; Δt 为锂电池输出电流采集的时间。

结合式(5)一式(8)可得

$$\gamma_{SOH} = \gamma_{SOH(0)} - \frac{C_{acu}}{a \cdot \left(\left(\frac{Q \cdot U_B \cdot \mu_{ASOC,min}}{\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} Pdt} \right)^{\frac{1}{x}} \cdot \beta_{DOD,max} \right)^b} \quad (9)$$

式中, $\gamma_{SOH(0)}$ 、 C_{acu} 、 Q 、 $\mu_{ASOC,min}$ 、 U_B 、 $\beta_{DOD,max}$ 、 a 、 b 、 x 均为常数。因此通过调节有功功率 P 可以影响 SOH 下降速率, 进而实现 SOH 均衡。

图 1 中, 由于锂电池通过 DC-DC 变换器串联在一起向负荷供电, 每块锂电池 DC-DC 变换器输出电流相等。若不对锂电池 DC-DC 变换器的输出电压进行控制, 则每块锂电池的输出有功功率均分。根据式(6)一式(8), 有功功率均分意味着每块锂电池的 β_{DOD} 一样, 在这种情况下, 根据式(5)可知, 各块单体锂电池的 SOH 不均衡。

3 基于一致性算法的 SOH 均衡方案

3.1 基于一致性算法的 SOH 均衡方案

由上面的分析可知, 若不对 DC-DC 变换器进行控制, 难以实现 SOH 均衡。因此, 本文提出一种锂电池组内单体锂电池 SOH 均衡方案, 如式(10)和

式(11)所示。

$$P_{ref,i} = P_{load} \cdot \frac{\beta_{DOD,i}}{\beta_{DOD,av} \cdot N} \quad (|\gamma_{SOH,i} - \gamma_{SOH,av}| > \varepsilon) \quad (10)$$

$$P_{ref,i} = \frac{P_{load}}{N} \quad (|\gamma_{SOH,i} - \gamma_{SOH,av}| \leq \varepsilon) \quad (11)$$

式中： $P_{ref,i}$ 为分配给第*i*块锂电池的有功功率参考值； P_{load} 为负荷功率需求值； $\beta_{DOD,i}$ 为锂电池*i*的DOD； $\beta_{DOD,av}$ 为所有锂电池DOD的平均值； $\gamma_{SOH,av}$ 为所有锂电池SOH的平均值； N 为串联锂电池个数； ε 为SOH均衡边界值。

若第*i*块锂电池的SOH值 $\gamma_{SOH,i}$ 与SOH平均值 $\gamma_{SOH,av}$ 的差满足： $|\gamma_{SOH,i} - \gamma_{SOH,av}| > \varepsilon$ （即SOH不均衡），则根据式(10)调节DC-DC变换器输出的有功功率；若第*i*块锂电池的 $\gamma_{SOH,i}$ 与SOH平均值 $\gamma_{SOH,av}$ 的差满足： $|\gamma_{SOH,i} - \gamma_{SOH,av}| \leq \varepsilon$ （即SOH均衡），则锂电池DC-DC变换器控制切换到式(11)，以保持SOH均衡效果。

若第*i*块锂电池的SOH值 $\gamma_{SOH,i}$ 与SOH平均值 $\gamma_{SOH,av}$ 的差满足： $|\gamma_{SOH,i} - \gamma_{SOH,av}| > \varepsilon$ （即SOH不均衡），则根据式(10)调节DC-DC变换器输出的有功功率；若第*i*块锂电池的 $\gamma_{SOH,i}$ 与SOH平均值 $\gamma_{SOH,av}$ 的差满足： $|\gamma_{SOH,i} - \gamma_{SOH,av}| \leq \varepsilon$ （即SOH均衡），则锂电池DC-DC变换器控制切换到式(11)，以保持SOH均衡效果。

$\beta_{DOD,av}$ 和 $\gamma_{SOH,av}$ 可利用一致性算法^[24]计算得到。下面以 $\beta_{DOD,av}$ 的计算为例进行说明。 $\gamma_{SOH,av}$ 参数的计算过程类似，不再详述。图3为应用一致性算法时各块锂电池代理通信图，通过相邻锂电池代理之间交换各自的DOD信息，便可求出 $\beta_{DOD,av}$ 。和传统集中式通信方法通过全局通信收集所有DOD信息、然后除以锂电池块数来得到 $\beta_{DOD,av}$ 的求解过程不同，一致性算法不要求集中控制器和全局通信，降低了系统成本和通信压力，具有良好的实际应用价值。 $\beta_{DOD,av}$ 的求解公式如式(12)所示。

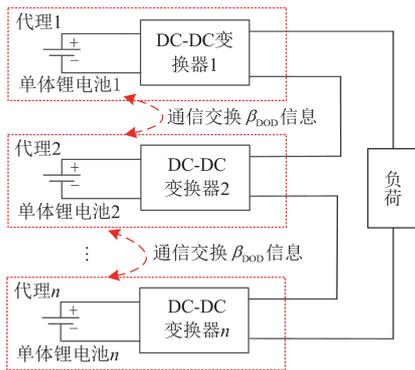


图3 锂电池代理通信图

Fig. 3 Communication diagram for lithium battery agent

$$\begin{cases} \beta_{DOD,iav}(k+1) = \beta_{DOD,i}(k) + \omega \sum_{j \in N_i} \lambda_{ij}(k+1), i \neq j \\ \lambda_{ij}(k+1) = \lambda_{ij}(k) + \beta_{DOD,jav}(k) - \beta_{DOD,iav}(k), i \neq j \end{cases} \quad (12)$$

式中： $\beta_{DOD,iav}(k)$ 为 $\beta_{DOD,i}$ 第*k*次迭代后的平均值；

ω 为比例因子； N_i 为锂电池代理的个数； $\lambda_{ij}(k)$ 的初值为0。

图4展示了锂电池 $\beta_{DOD,av}$ 的迭代求解过程，两块锂电池的 $\beta_{DOD,i}$ 初始值分别设置为0.2和0.8。从图4可以看出，在式(12)的作用下， $\beta_{DOD,i}$ 初始值大的锂电池其 $\beta_{DOD,i}$ 值逐渐下降； $\beta_{DOD,i}$ 初始值小的锂电池其 $\beta_{DOD,i}$ 值逐渐上升，在经过20次左右的迭代后，两块锂电池的 $\beta_{DOD,i}$ 逐步向其平均值(0.5)聚拢。此时，两块锂电池的 $\beta_{DOD,i}$ 差为0，迭代过程结束，由此验证了利用式(12)求解 $\beta_{DOD,av}$ 的可行性。

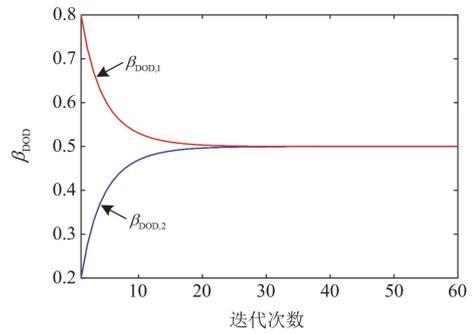


图4 $\beta_{DOD,av}$ 的迭代求解过程

Fig. 4 Iterative solution process of $\beta_{DOD,av}$

3.2 SOH均衡方案原理分析

假设锂电池DC-DC变换器工作在理想状态下，忽略其功率损耗，根据功率守恒原则，DC-DC变换器输入端和输出端的关系满足式(13)。

$$P_{ref,i} = U_{Bi} \cdot I_{ref,i} = U_{DC,ref,i} \cdot I_{load} \quad (13)$$

式中： $U_{DC,ref,i}$ 为第*i*块锂电池DC-DC变换器输出参考电压； $I_{ref,i}$ 为第*i*块锂电池的输出参考电流。

对式(13)进行整理，可以得到每块锂电池DC-DC变换器输出电压参考值 $U_{DC,ref,i}$ ，如式(14)所示。

$$U_{DC,ref,i} = \frac{P_{ref,i}}{I_{load}} = \frac{U_{Bi} \cdot I_{ref,i}}{I_{load}} \quad (14)$$

结合式(10)和式(14)分析可知，由于每块锂电池的 I_{load} 值一致，当 β_{DOD} 融入 $P_{ref,i}$ 后会影响到 $U_{DC,ref,i}$ ，进而影响到 $I_{ref,i}$ 。将 $I_{ref,i}$ 和锂电池输出的实际电流 I_i 作差，再经过PI控制器和PWM调制过程就可以控制锂电池DC-DC变换器输出能量值，进而调节锂电池SOH值趋于一致。

SOH均衡控制原理如图5所示。以3块单体锂电池串联系统为例，对SOH均衡原理进行说明。假设 $\gamma_{SOH,1} > \gamma_{SOH,2} > \gamma_{SOH,3}$ ，根据式(5)可知，要实现3块锂电池SOH均衡，均衡前3块锂电池应满足

$\beta_{DOD,1} > \beta_{DOD,2} > \beta_{DOD,3}$; 均衡后 3 块锂电池应满足 $\beta_{DOD,1} = \beta_{DOD,2} = \beta_{DOD,3}$ 。由式(6)可知, γ_{SOH} 较小的单体电池, 其 β_{DOD} 也小。由式(10)可知, SOH 均衡前, 锂电池 1 应输出的有功功率 $P_{ref,1}$ 多(处于深度放电); 根据式(14)可知: 锂电池 1 输出电流值应较大, 即 $I_{ref,1} > I_{load}$; 锂电池 1 的 DC-DC 电路应工作在升压状态, 即 $U_{DC1} > 650 \text{ V}$, 锂电池 1 将工作在 C 点; 锂电池 2 工作在 B 点, $U_{DC2} = 650 \text{ V}$; 锂电池 3 应输出的有功功率 $P_{ref,3}$ 少(处于浅度放电), 锂电池 3 输出电流值应较小, 即 $I_{ref,3} < I_{load}$; 锂电池 3 的 DC-DC 电路应工作在降压状态, 即 $U_{DC3} < 650 \text{ V}$, 锂电池 3 将工作在 A 点。这样即满足 $P_1 > P_2 > P_3$; $U_{DC1} > U_{DC2} > U_{DC3}$, 3 块锂电池的 SOH 差值随着时间的推移逐渐缩小。当 BMS 中的 SOH 监控模块检测到锂电池组内单体锂电池的 γ_{SOH} 与 $\gamma_{SOH,av}$ 的差值小于或等于均衡边界值 ε 时, 锂电池 DC-DC 变换器调制信号的生成方式将由式(10)转换成式(11), 此时 3 块锂电池输出有功功率均分, 锂电池 1 工作点由 C 点调整至 B 点; 锂电池 2 仍工作在 B 点; 锂电池 3 工作点由 A 点调整至 B 点, 3 块锂电池出力相同(即满足 $P_1 = P_2 = P_3$, $\beta_{DOD,1} = \beta_{DOD,2} = \beta_{DOD,3}$, $U_{DC1} = U_{DC2} = U_{DC3}$)。随着放电过程的进行, 3 块锂电池的 SOH 保持均衡。

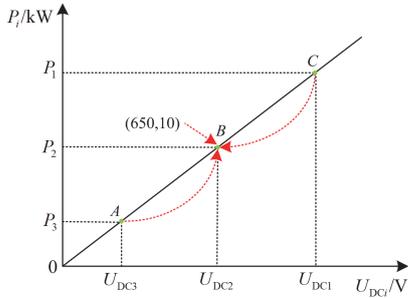


图 5 SOH 均衡控制原理图

Fig. 5 SOH balance control schematic diagram

图 6 为所提方案流程图。首先采集每块锂电池输出电流、电压等信息; 其次根据式(6)—式(8)计算每块锂电池的 β_{DOD} 值; 接着根据式(5)估算每块锂电池的 γ_{SOH} , 进而利用一致性算法计算所有单体锂电池的 $\gamma_{SOH,av}$; 然后根据 SOH 均衡判断条件选择锂电池 DC-DC 变换器控制方式, 由式(14)计算锂电池输出电流参考值; 最后将锂电池输出电流参考值与实际值作差后通过 PI 控制器和 PWM 模块得到调制信号, 从而实现锂电池组内单体锂电池 SOH 均衡。

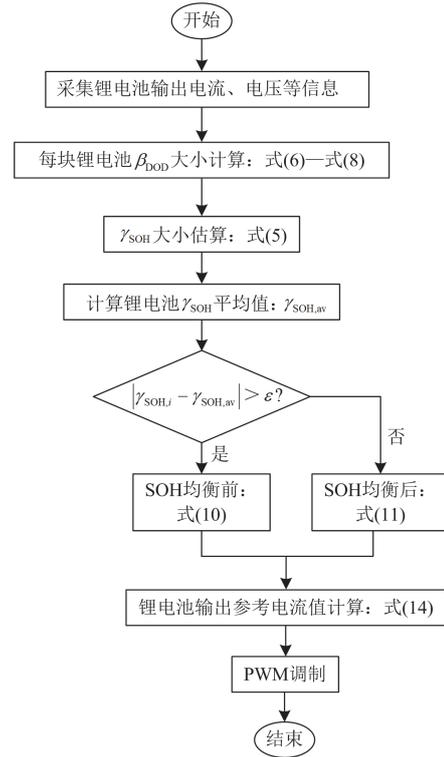


图 6 所提方案流程图

Fig. 6 Flowchart of proposed scheme

4 仿真实证

为验证所提方案的有效性, 通过 Matlab/Simulink 仿真软件按照图 1 搭建多块单体锂电池串联系统仿真模型。仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数名称	符号	仿真数值
单体锂电池输出电压	U_B	650 V
锂电池额定容量	Q_{rated}	200 Ah
锂电池累计生命周期数	C_{acu}	350
锂电池拟合系数	a	694
	b	0.795
DC-DC 变换器电感	L_1	$5 \times 10^{-4} \text{ H}$
	L_2	$5 \times 10^{-4} \text{ H}$
	L_3	$5 \times 10^{-3} \text{ H}$
DC-DC 变换器电容	C_1	$3 \times 10^{-6} \text{ F}$
	C_2	$3 \times 10^{-6} \text{ F}$
	C_3	$7.8 \times 10^{-4} \text{ F}$
负荷功率	P	30 000 W
SOH 均衡边界值	ε	0.001

工况 1: 未采用所提方案 SOH 特性分析

图 7 为未采用所提方案的仿真波形, 其中绿色、

红色、蓝色曲线分别为锂电池 1、2、3 的仿真波形。未采用所提控制方案时, 3 块锂电池串联在一起向负荷供电。此时, 3 块锂电池均分负荷, 输出有功功率相等, 如图 7(b)所示。在这种情况下, 由图 7(c)可知, 3 块锂电池以相同 β_{DOD} 进行放电。由式(5)可知, 在锂电池的初始 γ_{SOH} 值不一致的前提下, 相同的锂电池 β_{DOD} 值会导致图 7(a)中 SOH 不均衡。图 7(d)为锂电池输出电压波形, 3 块锂电池端稳态电压值都为 650 V。图 7 说明若不采取合理的方式对锂电池进行控制, 无法实现锂电池的 SOH 均衡。

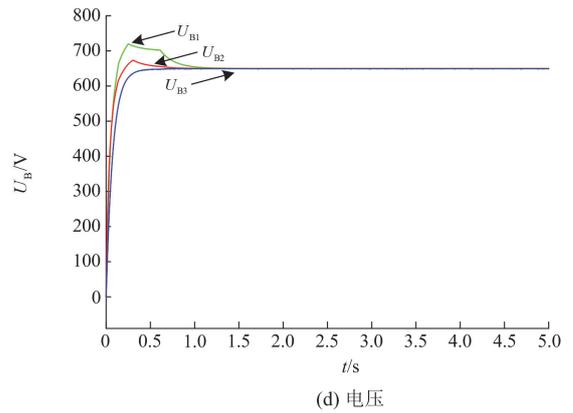
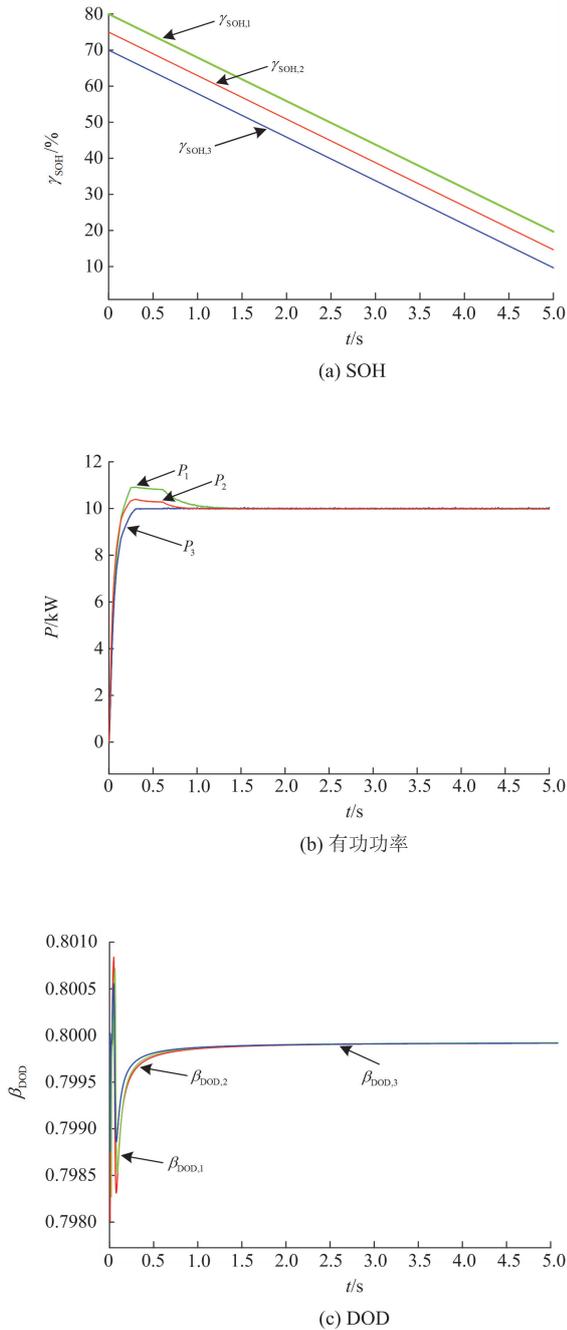
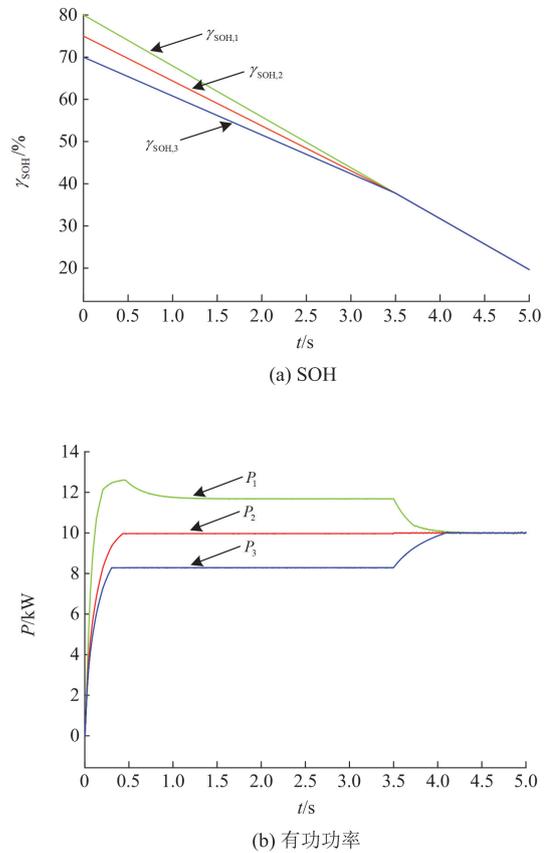


图 7 未采用所提方案的仿真波形
Fig. 7 Simulated waveforms without adopting the proposed scheme

工况 2: 采用所提方案的仿真验证

图 8 为采用所提控制方案的仿真波形, 其中绿色、红色、蓝色曲线分别为锂电池 1、2、3 的仿真波形。在 $t = 3.5$ s 前, 3 块锂电池 SOH 均衡边界值 ε 大于设置值, 锂电池工作在调压模式(即式(10))。锂电池 1 的 DC-DC 变换器工作在升压状态, 锂电池 3 的 DC-DC 变换器工作在降压状态, 如图 8(d)所示。由于电压发生变化, 根据式(14), 相较图 7(b), 图 8(b)中锂电池 1 输出有功功率增大; 锂电池 3 输出有功



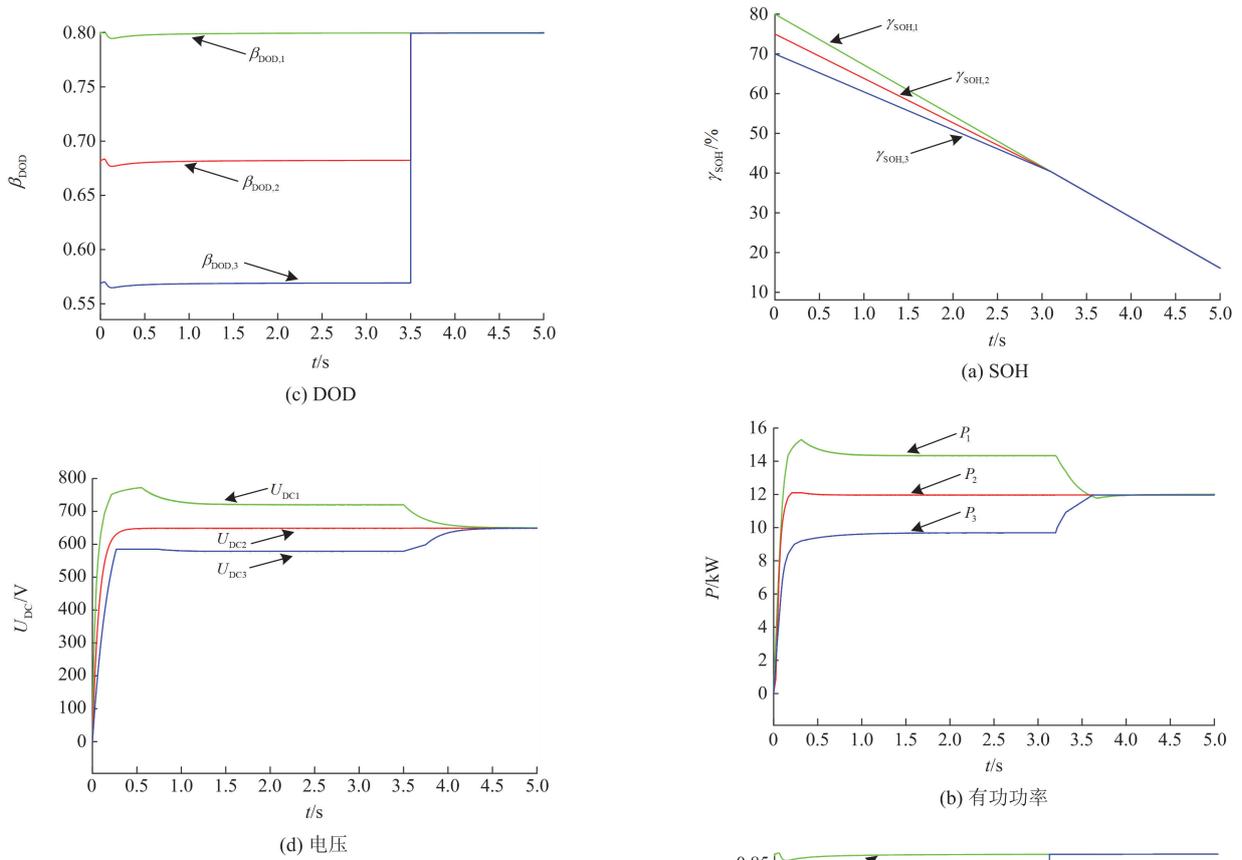


图 8 采用所提控制方案的仿真波形

Fig. 8 Simulated waveforms using the proposed control scheme

功率减小。此时 $\beta_{\text{DOD},1} > \beta_{\text{DOD},2} > \beta_{\text{DOD},3}$, 如图 8(c) 所示, 说明锂电池 1 处于深度放电状态, 而锂电池 3 处于浅度放电状态。 $t = 3.5 \text{ s}$ 时, 3 块锂电池 SOH 均衡差小于均衡边界值 ε , 此时 DC-DC 变换器的控制方式由式(10)调整为式(11), 3 块锂电池工作在功率均分模式, 输出有功功率均分, DOD 也保持一致, 此时 3 块锂电池的 SOH 保持均衡, 如图 8(a)所示。

工况 3: 不同负荷下所提方案的仿真实验验证

图 9 为所提方案在不同负荷下的仿真波形, 其中绿色、红色、蓝色曲线分别为锂电池 1、2、3 的仿真波形。在该工况中将负荷值由 30 000 W 调整为 36 000 W。和图 8 对比可知, 在负荷加重的影响下, 图 9(b)中 3 块锂电池输出有功功率在均衡前后均大于图 8(b)中 3 块锂电池有功功率。同时, 有功功率增加会造成图 9(c)中 3 块锂电池的 β_{DOD} 大于图 8(c)中 3 块锂电池的 β_{DOD} 。此外, 由于 β_{DOD} 的增加, 图 9(a)中 3 块锂电池的 SOH 均衡时间比图 8(a)缩短大概 0.4 s, 说明加重负荷不会影响 SOH 均衡效果, 但会加快均衡速度。图 9(d)说明负荷的增加会导致电压上升。因此, 图 9(d)中锂电池 1、3 的 DC-DC

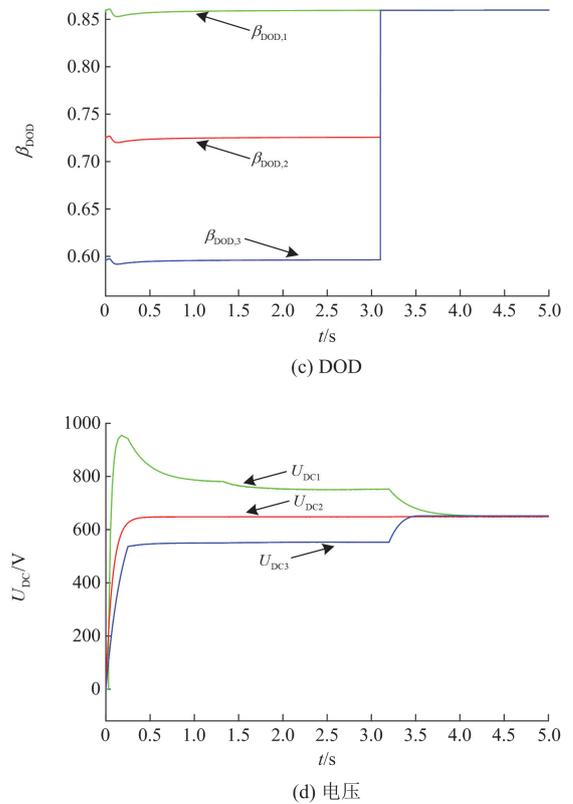


图 9 不同负荷下的仿真波形

Fig. 9 Simulated waveforms under different loads

变换器输出电压与锂电池 2 的 DC-DC 输出电压差值大小明显大于图 8(d)中锂电池 1、3 的 DC-DC 变换器输出电压与锂电池 2 的 DC-DC 输出电压差值大小。

工况 4: 通信中断仿真验证

在通信系统中可能存在通信中断的情况^[25]。图 10 为所提方案在通信中断工况下的仿真波形, 其中绿色、红色、蓝色曲线分别为锂电池 1、2、3 的仿真波形。在 $t_1 = 1.0\text{ s}$ 时, 3 块锂电池出现通信中断, $t_2 = 1.5\text{ s}$ 时通信恢复正常。由图 10(b)可知, 由于 3 块锂电池在 $t_1 \sim t_2$ 区间通信中断, 式(10)中的 $\beta_{\text{DOD,av}}$ 不能求出, 此时 $\beta_{\text{DOD,av}} = \beta_{\text{DOD,i}}$ (即 3 块锂电池按照式(11)进行有功功率分配), 3 块锂电池将负荷平均

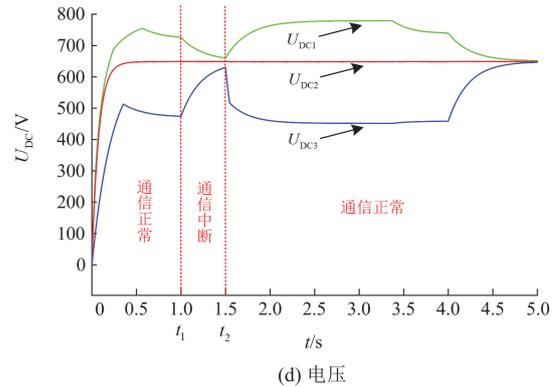


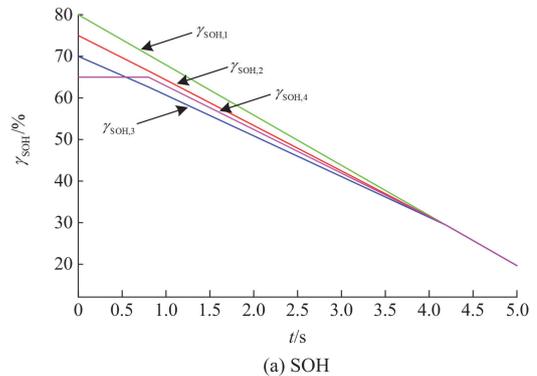
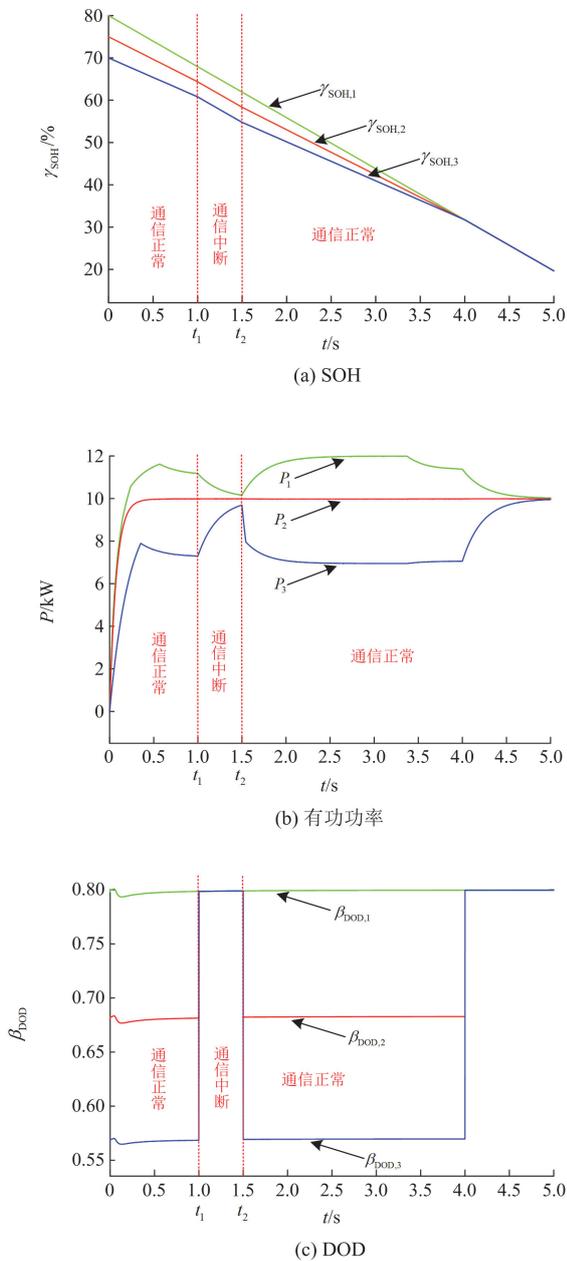
图 10 通信中断仿真波形

Fig. 10 Simulation waveforms of communication interruption

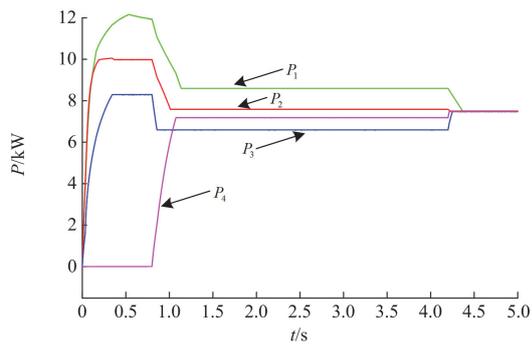
分配, 3 块锂电池输出有功功率趋于均分。在 $t_2 = 1.5\text{ s}$ 时通信恢复正常, 式(10)中 $\beta_{\text{DOD,av}}$ 能再次求得。此时, 3 块锂电池再次按照式(10)进行有功功率分配, 如图 10(b)所示。图 10 说明通信中断会对 SOH 均衡效果产生影响, 但一旦通信恢复, 所提方案经过一段时间调节后, 3 块锂电池 SOH 依然能够再次均衡。

工况 5: 系统扩容性仿真验证

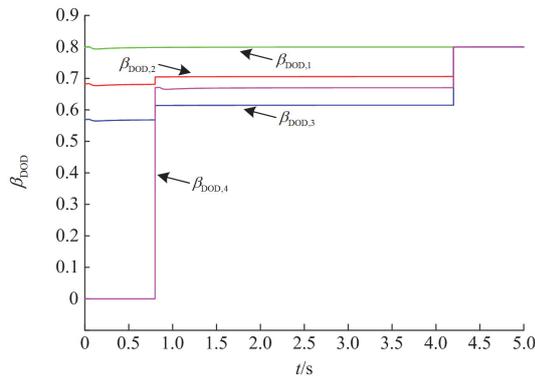
为应对微电网负荷增加, 通常要求所提算法具有一定的扩容能力。图 11 为所提方案在系统扩容下的仿真波形, 其中绿色、红色、蓝色、粉色曲线分别为锂电池 1、2、3、4 的仿真波形。在 $t = 0.8\text{ s}$ 前, 图 11 中 3 块锂电池向负荷供电, 锂电池 4 停机(输出有功功率为 0)。在 $t = 0.8\text{ s}$ 时启动锂电池 4, 系统内锂电池数量由 3 块扩容为 4 块。图 11(a)说明系统内锂电池数量增加后不影响所提方案的控制效果。由图 11(d)可知, 锂电池 1 和锂电池 2 的 DC-DC 变换器在 SOH 均衡前处于升压状态(电压高于 650 V); 锂电池 3 和锂电池 4 的 DC-DC 变换器在 SOH 均衡前处于降压状态(电压低于 650 V), 因此, 在 SOH 均衡前锂电池 1 和锂电池 2 输出有功功率多, 锂电池 3 和锂电池 4 输出有功功率少。SOH 均衡后, 4 块锂电池有功功率均分, 如图 11(b)所示, DOD 保持一致, 如图 11(c)所示。



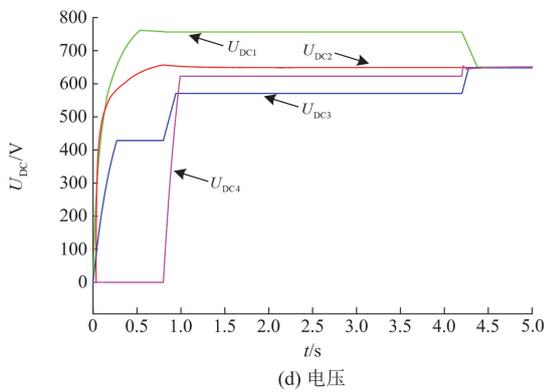
(a) SOH



(b) 有功功率



(c) DOD



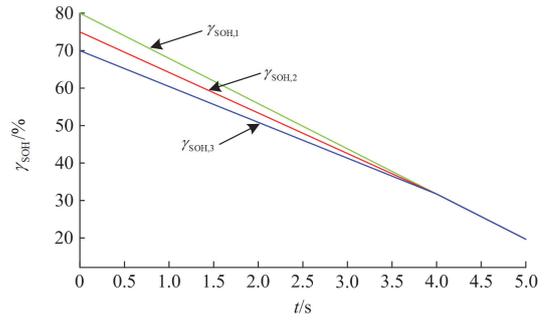
(d) 电压

图 11 系统扩容仿真波形

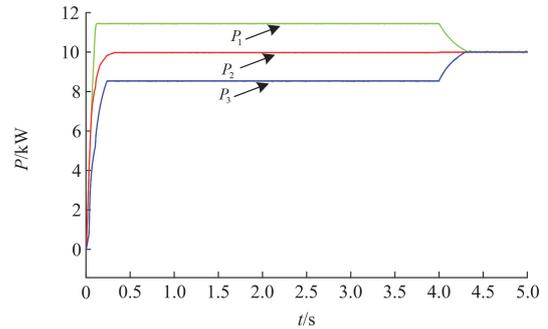
Fig. 11 Simulation waveforms of system scalability

工况 6: DOD 出现测量误差仿真验证

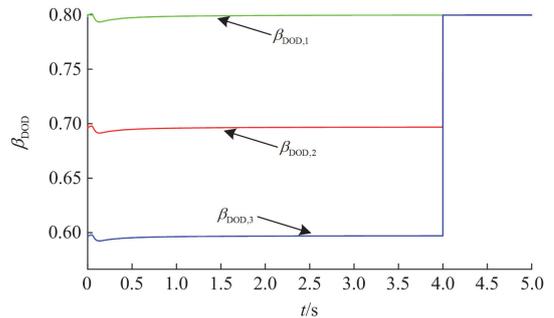
由安时积分法得到的 SOC 估算值非精确值^[26], 由 SOC 间接得到 DOD 难免会和真实值产生误差。图 12 为 DOD 出现测量误差工况下所提方案的仿真波形, 其中绿色、红色、蓝色曲线分别为锂电池 1、2、3 的仿真波形。由于 DOD 出现测量误差, 图 12(c) 中的 $\beta_{DOD,2}$ 由图 8(c) 中的 0.683 变为 0.697, 图 12(c) 中的 $\beta_{DOD,3}$ 由图 8(c) 中的 0.569 变为 0.597。图 12(c) 中的 $\beta_{DOD,1}$ 和图 8(c) 相比未发生变化。和图 8(b) 对比可知, 图 12(b) 中锂电池 1 输出有功功率值在均衡前略



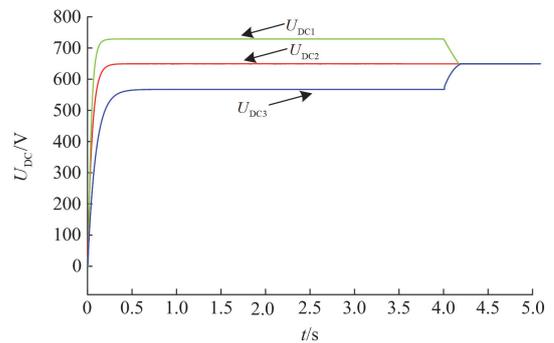
(a) SOH



(b) 有功功率



(c) DOD



(d) 电压

图 12 DOD 出现测量误差时的仿真波形

Fig. 12 Simulated waveforms under measurement error in DOD

小于图 8(b) 中锂电池 1 有功功率值, 锂电池 3 输出有功功率值在均衡前略大于图 8(b) 中锂电池 3 有功

功率值,但均满足 SOH 值高的锂电池输出有功功率多、SOH 值低的锂电池输出有功功率少的 SOH 调节法则。SOH 均衡后 3 块锂电池输出有功功率均分。此外,和有功功率波形类似,图 12(d)说明, DOD 测量误差也会对 3 块锂电池 DC-DC 变换器输出电压产生影响,但图 12(a)说明, DOD 存在测量误差时不会影响 SOH 均衡效果。

5 结论

针对现存锂电池组内串联单体锂电池主动 SOH 均衡方案需要集中控制器和全局通信的问题,提出一种基于一致性算法的锂电池组内串联单体锂电池 SOH 主动均衡方案,仿真结果验证了所提方案的有效性。主要结论如下:

1) 调节锂电池 DC-DC 变换器输出功率可影响锂电池 DOD 参数值,进而对 SOH 下降速度进行调节。

2) 将锂电池 DOD 参数与有功功率参考值结合,可合理调节锂电池的 DOD,减少 SOH 均衡差。当锂电池 SOH 均衡差小于 SOH 均衡边界值时,将算法由 SOH 调节模式转变为功率均分模式即可保持 SOH 均衡。

3) 利用一致性算法求解 $\beta_{DOD,av}$,可省去集中控制器,减少系统通信信号数量、降低成本。仿真结果说明,所提方案适用于锂电池组内多串联单体锂电池系统,在负荷变化、通信中断、系统扩容和 DOD 出现测量误差工况下仍然能有效均衡 SOH。

参考文献

- [1] LIANG Zipeng, DONG Zhaoyang, LI Chaojie, et al. A data-driven convex model for hybrid microgrid operation with bidirectional converters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(2): 1313-1316.
- [2] 岳家辉,夏向阳,吕崇耿,等. 计及健康特征信息量的锂离子电池健康状态与剩余寿命预测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 74-87.
YUE Jiahui, XIA Xiangyang, LÜ Chonggeng, et al. Research on the prediction of state of health and remaining useful life of lithium-ion batteries considering the amount of health factors information[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 74-87.
- [3] LIU Yanshuo, WANG Licheng, LI Dezhi, et al. State-of-health estimation of lithium-ion batteries based on electrochemical impedance spectroscopy: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(3): 1-16.
- [4] 孙丙香,李茂,张维戈,等. 温度不一致对串联电池组放电性能的量化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 150-158.
- [5] SUN Bingxiang, LI Mao, ZHANG Weige, et al. Quantitative study on the effect of temperature inconsistency on the discharge performance of a series battery pack[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 150-158.
- [6] WEI Zhongbao, LIU Kailong, LIU Xinghua, et al. Multilevel data-driven battery management: from internal sensing to big data utilization[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(4): 4805-4823.
- [7] 翟苏巍,李文云,周成,等. 基于改进概率神经网络的储能电池荷电状态估计[J]. 智慧电力, 2024, 52(2): 94-100.
ZHAI Suwei, LI Wenyun, ZHOU Cheng, et al. State-of-charge estimation of energy storage batteries based on modified probabilistic neural networks[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 94-100.
- [8] 晋殿卫,顾则宇,张志宏. 锂电池健康度和剩余寿命预测算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 122-130.
JIN Dianwei, GU Zeyu, ZHANG Zhihong. Lithium battery health degree and residual life prediction algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 122-130.
- [9] SHU Hongchun, LI Wenlong, WANG Guangxue, et al. Online collaborative estimation technology for SOC and SOH of frequency regulation of a lead-carbon battery in a power system with a high proportion of renewable energy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(1): 52-64.
- [10] 毛玲,温佳林,赵晋斌,等. 基于集成 ELM 的锂离子电池充电截止电压下的 SOC 和 SOH 联合估计[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 86-95.
MAO Ling, WEN Jialin, ZHAO Jinbin, et al. Joint estimation of SOC and SOH at lithium-ion battery charging cut-off voltage based on an ensemble extreme learning machine[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 86-95.
- [11] XIA Zhiyong, QAHOUQ J A A. State-of-charge balancing of lithium-ion batteries with state-of-health awareness capability[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(1): 673-684.
- [12] 吴文进,郭海婷,苏建徽,等. 基于自适应模糊 PID 算法的锂电池组双层均衡控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 111-117.
WU Wenjin, GUO Haiting, SU Jianhui, et al. Dual-layer equalization control of lithium batteries based on an adaptive fuzzy PID algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 111-117.
- [13] 康龙云,万蕾,谢缔,等. 一种开关管复用的电感型串联锂电池均衡电路[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(1): 46-54.

- KANG Longyun, WAN Lei, XIE Di, et al. Inductive equalizer for series-connected lithium batteries based on reutilizing switches[J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(1): 46-54.
- [13] 张文昕, 赵志勇, 于华龙, 等. 适用于直流链式储能的电池簇荷电状态自均衡控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(2): 159-166.
- ZHANG Wenxin, ZHAO Zhiyong, YU Hualong, et al. Self-equalizing control strategy for state of charge of battery cluster in DC cascaded H-Bridge converter- battery energy storage system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(2): 159-166.
- [14] LI Nan, GAO Feng, HAO Tianqu, et al. SOH balancing control method for the MMC battery energy storage system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(8): 6581-6591.
- [15] 薄利明, 郑惠萍, 张世锋, 等. 锂电池健康状态均衡技术综述[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(4): 11-18.
- BO Liming, ZHENG Huiping, ZHANG Shifeng, et al. Review on health state equalization technology for lithium batteries[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(4): 11-18.
- [16] 颜宁, 李相俊, 张博, 等. 基于电池健康度的微电网梯次利用储能系统容量配置方法[J]. *电网技术*, 2020, 44(5): 1630-1638.
- YAN Ning, LI Xiangjun, ZHANG Bo, et al. Energy storage capacity allocation method with cascade utilization based on battery health in microgrids[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(5): 1630-1638.
- [17] CHEN Guicheng, SHANG Yunlong, ZHAO Guangcai, et al. Consistent control for SOH of energy storage batteries based on game theory[C]// *IEEE China Automation Congress (CAC)*, October 22-24, 2021, Beijing, China: 2666-2668.
- [18] MA Zhan, GAO Feng, GU Xin, et al. Multilayer SOH equalization scheme for MMC battery energy storage system[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(12): 13514-13527.
- [19] 吴青峰, 智泽英, 于少娟, 等. 基于多代理的微电网分布式储能系统健康状态平衡方案[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(2): 104-112.
- WU Qingfeng, ZHI Zeying, YU Shaojuan, et al. SOH balancing scheme for distributed energy storage systems in microgrid based on multi-agent[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2022, 43(2): 104-112.
- [20] LÜ Zhiqiang, GAO Renjing, CHEN Lin, et al. Li-ion battery state of health estimation and remaining useful life prediction through a model-data-fusion method[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(6): 6228-6240.
- [21] 杨智鹏, 宋政湘, 孟锦豪, 等. 基于单体到模组迁移的磷酸铁锂储能系统 SOH 评估方法[J]. *高电压技术*, 2023, 49(10): 4142-4149.
- YANG Zhipeng, SONG Zhengxiang, MENG Jinhao, et al. SOH evaluation method for LFP energy storage system based on cell-to-module transfer[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(10): 4142-4149.
- [22] GOUD J S, KALPANA R, SINGH B. An online method of estimating state of health of a li-ion battery[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 36(1): 111-119.
- [23] 李楠, 高峰. 基于储能型模块化多电平系统的多时间尺度控制策略[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(17): 47-56.
- LI Nan, GAO Feng. Multi-time scale operational principle for battery integrated modular multilevel converter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(17): 47-56.
- [24] 贺文, 陈珍萍, 胡伏原, 等. 基于一致性的综合能源系统低碳经济调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(19): 42-53.
- HE Wen, CHEN Zhenping, HU Fuyuan, et al. Consensus-based low-carbon economic dispatching of integrated energy systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(19): 42-53.
- [25] ZHANG Jiancheng, SUN Bao, ZHAO Daduan. A novel event-triggered secondary control strategy for distributed generalized droop control in microgrid considering time delay[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(5): 5963-5978.
- [26] MENG Jinhao, RICCO M, LUO Guangzhao, et al. An overview and comparison of online implementable SOC estimation methods for lithium-ion battery[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(2): 1583-1591.

收稿日期: 2024-05-19; 修回日期: 2024-08-05

作者简介:

吴青峰(1987—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源并网及控制技术、储能系统状态参数估算及均衡技术; E-mail: 827211907@qq.com

杨凯义(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为储能系统状态参数均衡技术及能量状态优化控制。E-mail: 18834175672@163.com

(编辑 周金梅)