

一种用于模块化 CPC 均衡充电的最优化策略

张嘉蕾, 王超宇(中国电源学会学生会员), 樊郭宇, 李悦, 吕高
(山西大学电力与建筑学院, 太原 030006)

摘要: 随着锂电池在工业及生活中的广泛应用, 锂电池组均衡充电策略的高效性及快速性也变得愈发重要, 因此构建单体电池与电池模块间 CPC (cell-to-pack-to-cell) 的均衡充电系统, 以解决锂电池组快速均衡充电问题。首先, 对均衡系统进行模块化处理, 建立模块内和模块间的均衡电路; 然后, 提出 1 种用于均衡充电的最优化策略, 对所提策略模型进行分层求解, 顶层通过二分法来计算充电时间, 底层通过梯度下降法来优化充电电流; 最后, 通过与非模块化均衡充电策略下的充电时间、均衡时间、单体电池端电压及均衡器承担电压进行仿真对比, 验证了所提策略的可行性和有效性。

关键词: 锂电池组; 均衡控制; 梯度下降法; 快速充电策略

Optimization Strategy for Modular CPC Balanced Charging

ZHANG Jialei, WANG Chaoyu, *Student Member, CPSS*, FAN Guoyu, LI Yue, LÜ Gao
(School of Electric Power, Civil Engineering and Architecture, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Along with the widespread applications of lithium batteries in industry and daily life, the efficiency and speed under balanced charging strategies for lithium battery packs have become increasingly important. A modular cell-to-pack-to-cell (CPC) balanced charging system is constructed to solve the problem of fast equalization charging for lithium battery packs. First, the equalization system is modularized, and the equalization circuits within and between modules are established. Then, an optimization strategy for balanced charging is proposed, under which the proposed model is solved hierarchically, i.e., the charging time is calculated using the binary method in the top layer, and the charging current is optimized using the gradient descent method in the bottom layer. Finally, through a comparison with the charging time, equalization time, cell terminal voltage and equalizer voltage under the non-modular balanced charging strategy, the feasibility and effectiveness of the proposed strategy are verified.

Keywords: Lithium battery pack; balanced control; gradient descent method; fast charging strategy

锂离子电池具有体积小、质量轻、标称电压相对较高、循环寿命长、无记忆效应等优越性能, 已被广泛应用于电动汽车、微电网等众多行业中^[1-2]。充电过程是锂电池组储存能量的重要过程, 对锂电池组的性能及寿命有较大影响^[3-5]。不当的充电策略可能会导致电池容量衰减甚至造成火灾, 然而若为了安全使用较小的充电电流又会限制充电速率, 使充电时间过长。因此, 良好的锂电池组充电策略对锂电池组管理和使用愈发重要^[6-11]。

随着锂电池在国内外市场的广泛应用, 对锂

电池充电策略的研究也在不断发展。文献[12]提出 1 种基于粒子群优化算法的模糊控制搜索策略, 提供了 1 种优化充电时间的充电模式; 文献[13]提出 1 种基于遗传算法的多目标优化充电策略, 通过充电时间和温度变化进行多目标优化, 搜索其最佳充电电流轨迹, 优化充电模式, 平衡充电时间和电池温度变化; 文献[14]提出 1 种基于锂电池电热老化模型的充电优化策略, 以确定最佳充电电流, 从而在电池健康、充电时间和能量转换效率之间取得平衡; 文献[15]基于模型预测控制 MPC (model predictive control) 的充电策略, 同时考虑了充电时间和寿命; 文献[16]提出 1 种用于电池充电控制的

显式MPC 算法, 通过将显式解作为分段函数进行预计算,可以降低传统 MPC 方法的计算复杂性。

然而上述这些方法均是对单个电池进行充电,由于制作工艺、外部环境等原因,电池组内部单体电池会存在内阻、容量等方面的差异^[17],这种差异可能导致过充或过放、容量衰减、安全等问题,也会导致在对电池组充电时,电池组的充电速度被限制^[18-19]。在对电池组充电的研究过程中,电池组均衡系统的作用需要被考虑到充电策略中。目前,电池组充电均衡系统分为主动均衡系统和被动均衡系统。被动均衡系统是指对电池组中具有较高能量的电池进行能量消耗来减少电池组内电池能量差,主要通过将电池两端并联放电电阻来消耗电压较高的电池能量,从而实现均衡。与主动均衡系统相比,由于其均衡电流较小,使得均衡时间长、均衡效率低、能量损耗较大,同时由于电阻消耗能量会导致系统过热,严重时会造成安全隐患。随着对均衡系统的研究不断发展,被动均衡已经不再作为均衡充电系统的均衡方式。而主动均衡系统通过外部均衡器(如开关变压器、开关电容器和转换器)将较高的能量输送到能量较低的电池,而不是消耗能量,从而实现更节能、更快的均衡效果^[20-24]。主动均衡策略在能量转移方式上又分为单体电池与单体电池间能量传输 CTC(cell-to-cell)和单体电池与电池组间能量传输 CPC(cell-to-pack-to-cell)均衡。CTC 仅能在单体电池与单体电池之间传输能量,导致均衡时间长、能量损耗大;CPC 是模块化电池单元与电池模块间的能量传递,可以提供更快的均衡速度,均衡效率更高。文献[25]提出 1 种基于凸优化的离线控制策略,用于电池组的能量 CPC 均衡;文献[26]通过

设计用于均衡状态估计的双滤波器,提出 1 种基于最佳参考的均衡控制算法,用于大功率锂离子电池组 CPC 均衡。而传统的 CPC 均衡系统因为电池组侧的高电压给均衡器硬件带来了巨大的负担,因此不适合直接用于大型电池组。

综上所述,针对现有 CPC 均衡充电策略的问题,本文提出 1 种用于模块化 CPC 均衡充电的最优化策略。顶层构建了以充电时间为目标,以锂离子电池组 SOC 状态变化为约束的数学模型;底层构建了以最小化锂离子电池组 SOC 变化量为优化目标,以限制充电电流为变量的 SOC、端电压及能量损耗为约束条件的数学模型,通过分层处理不断迭代进行优化。

1 模块化均衡充电系统

本文所采用的模块化的 CPC 均衡充电结构如图 1 所示,将电池组分为 n 个电池模块,每个模块包含 m 个单体电池。在每个模块中,当电池的 SOC 大于或小于电池模块的平均 SOC 时,模块内均衡系统用于单体与单体电池的电量均衡。模块间均衡器用于相邻电池模块之间的电量均衡。由于每个电池模块的电压远低于整个电池组的电压,此结构可以极大地减少均衡系统中电气部件的耐受电压。此外,由于模块间结构简单,均衡系统中的元件和电池模块易于更换,使得均衡系统的维护比非模块化 CPC 均衡系统方便得多。

模块内均衡系统和模块间均衡系统采用 Cuk 电路作为基本电路进行构建,如图 1 所示。图 1 左侧为 2 块电池组成的 Cuk 均衡电路, B_1 、 B_2 为参与均衡控制的锂离子电池, L_1 、 L_2 为储能电感, C_1 为传

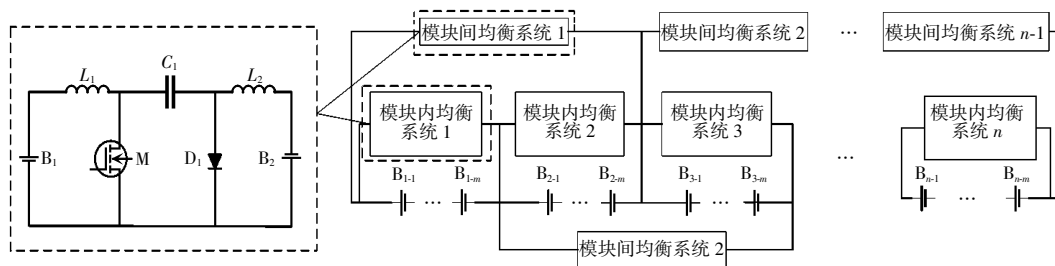


图 1 基于模块化的 CPC 均衡充电系统

Fig. 1 Modular CPC balanced charging system

输能量的耦合电容, M 为开关功率管, D_1 为续流二极管。

设均衡周期时间为 T_s , 开关 M 的占空比为 D 。均衡通路工作过程中具有 2 个连续工作状态, 分别为 M 导通状态和 M 关断状态。

在 M 导通时, 等效电路如图 2 所示。二极管 D_1 反偏截止, 电池 B_1 与电感 L_2 形成回路, 电池 B_1 对电感 L_1 进行充电; 电容 C_1 与电池 B_2 、电感 L_2 形成导通回路, 电容 C_1 对电池 B_2 、电感 L_2 放电。

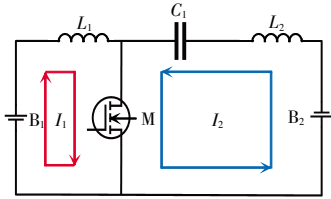


图 2 开关开通时电流回路

Fig. 2 Current circuit when switch is turned on

在 M 关断期间, 等效电路如图 3 所示。二极管 D_1 正向导通, 电池 B_1 与电感 L_1 、电容 C_1 形成闭合回路, 电感 L_1 经二极管 D_1 续流对电容 C_1 充电; 电感 L_2 与电池 B_2 形成闭合回路, 电感 L_2 经二极管 D_1 续流向电池 B_2 充电。

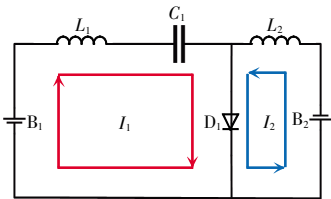


图 3 开关关断时电流回路

Fig. 3 Current circuit when switch is turned off

2 最优化控制策略

锂电池组均衡充电的最优化策略是以最小化充电时间为目标, 以锂电池组的充电电流、端电压、荷电状态和能量损耗为约束条件进行优化。如图 1 所示, 由于电池组内各电池串联充电, 因此各单体电池的充电时间 t 相同, 以 t 为目标函数; 以 SOC 变化、端电压为等式约束; 以端电压幅值限制、充电电流限制、均衡电流限制及充电过程中电池散热损耗限制分别作为不等式约束。在电池组参数限制及

减小能量损耗的前提下构建最小化充电时间模型, 对应的数学模型可表示为

$$\begin{cases} \min t \\ \text{st. } \mathbf{X}(k+1) = \mathbf{X}(k) + \frac{\eta t}{3600Q} [\mathbf{I}_{\text{cha}}(k) + \mathbf{I}_{\text{equ}}(k)] \\ 0.99 \leq \mathbf{X}(k+1) \leq 1.05 \\ \mathbf{Y}(k+1) + \mathbf{R}[\mathbf{I}_{\text{cha}}(k) + \mathbf{I}_{\text{equ}}(k)] = \mathbf{Y}_m \\ \mathbf{Y}_m \leq \mathbf{Y}_{\text{max}} \\ \mathbf{I}_{\text{equ}}(k+1) \leq \mathbf{I}_{\text{equ}}^{\text{max}} \\ \mathbf{I}_{\text{cha}}(k+1) \leq \mathbf{I}_{\text{cha}}^{\text{max}} \\ \sum_{k=1}^{N-1} [\mathbf{I}_{\text{cha}}(k) + \mathbf{I}_{\text{equ}}(k)]^T \mathbf{R} [\mathbf{I}_{\text{cha}}(k) + \mathbf{I}_{\text{equ}}(k)] t \leq J_{\text{max}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}(k) = [X_{1-1}(k), X_{1-2}(k), \dots, X_{n-m}(k)]^T$, $X_{n-m}(k)$ 为电池组第 n 个模块内第 m 个单体电池经过 k 次迭代后的 SOC 计算值; Q 为锂电池容量; η 为锂电池库仑效率; $\frac{\eta t}{3600Q} [\mathbf{I}_{\text{cha}}(k) + \mathbf{I}_{\text{equ}}(k)]$ 为 SOC 的变化量, 是充电量与电池容量的比值, 根据安时积分法, 充电量是充电总电流 $\mathbf{I}_{\text{cha}}(k) + \mathbf{I}_{\text{equ}}(k)$ 与时间 t 和库仑效率 η 的乘积; $\mathbf{I}_{\text{cha}}(k) = [I_{\text{cha}}^{1-1}(k), I_{\text{cha}}^{1-2}(k), \dots, I_{\text{cha}}^{n-m}(k)]^T$, $I_{\text{cha}}^{n-m}(k)$ 为电池组第 n 个模块内第 m 个单体电池的充电电流经过 k 次迭代后的计算值, 由于电池组内各个电池间串联, 故流过每个电池的充电电流相同; $I_{\text{cha}}^{\text{max}}$ 为锂电池最大充电电流; $\mathbf{I}_{\text{equ}}(k) = [I_{\text{equ}}^{1-1}(k), I_{\text{equ}}^{1-2}(k), \dots, I_{\text{equ}}^{n-m}(k)]^T$, $I_{\text{equ}}^{n-m}(k)$ 为电池组第 n 个模块内第 m 个单体电池流过的均衡电流经过 k 次迭代后的计算值; $I_{\text{equ}}^{\text{max}}$ 为单体锂电池最大均衡电流; $\mathbf{I}_{\text{equ}}(k+1) \leq \mathbf{I}_{\text{equ}}^{\text{max}}$ 和 $\mathbf{I}_{\text{cha}}(k+1) \leq \mathbf{I}_{\text{cha}}^{\text{max}}$ 分别表示在充电过程中充电电流和均衡电流不能超过最大值; $\mathbf{Y}(k) = [Y_{1-1}(k), Y_{1-2}(k), \dots, Y_{n-m}(k)]^T$, $Y_{n-m}(k)$ 为电池组第 n 个模块内第 m 个单体电池经过 k 次迭代后得到的开路电压, 根据锂电池等效 RC 电路模型, 求解出锂电池端电压 Y_m , 并对端电压进行不等式约束; Y_{max} 为最大端电压; $\sum_{k=1}^{N-1} [\mathbf{I}_{\text{cha}}(k) + \mathbf{I}_{\text{equ}}(k)]^T \mathbf{R} [\mathbf{I}_{\text{cha}}(k) + \mathbf{I}_{\text{equ}}(k)] t \leq J_{\text{max}}$ 表示内阻上的能量损耗不能超过最大值; \mathbf{R} 为由单体电池内阻作为参数的对角矩阵, $\mathbf{R} = \text{diag}[R_{1-1}, R_{1-2}, \dots,$

R_{n-m}], R_{n-m} 为第 n 个模块的第 m 个电池内阻值。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{1-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R_{1-2} & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & R_{n-m} \end{bmatrix} \quad (2)$$

3 模型求解

由于式(1)数学模型中优化目标 t 不是固定值, 充电时间与充电电流之间无函数关系进行表达, 且在优化模型中作为目标函数的时间 t 同时作为约束方程的变量, 这就使得在进行最优化求解过程中端电压、SOC 及能量损耗均是不能直接根据充电电流和时间 t 确定的量, 故其数学模型无法用常规优化方法直接求解。因此, 本文对数学模型进行分层求解, 具体过程如图 4 所示。

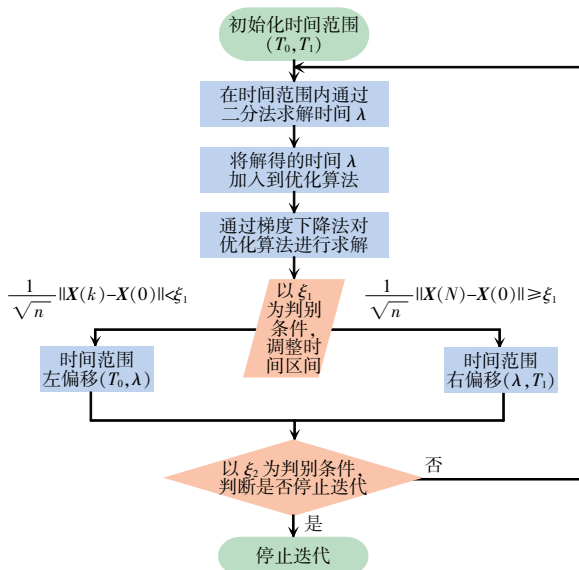


图 4 模型分层求解流程

Fig. 4 Flow chart of model solving in a hierarchical manner

3.1 模型分层求解

步骤 1 顶层求解: 给定 1 个充电时间范围 (T_0, T_1) , 并在此时间范围内对充电时间检索, 具体可通过二分法检索得到, $\lambda = (T_0 + T_1) / 2$, 将 λ 作为已知量代入步骤 2 中。

步骤 2 底层求解: 由于充电时间与 SOC 增长量呈正比关系, 因此在最优化充电策略中, 以持续变化电流对锂电池组进行充电, 通过对 SOC 的最

终量进行限制, 可以将充电时间等价于 SOC 的增长量, 即在锂电池组充电结束时对 SOC 进行限制的前提下, SOC 增长越少, 充电时间越短, 从而减少锂电池组的过度充电。先将式(1)中以最小化充电时间 t 为目标的模型转换为以最小化 SOC 增长量为目标的模型, 并通过梯度下降法对其进行求解, 得到电池的荷电量 $\mathbf{X}(k)$, 模型可表示为

$$\begin{cases} \min \mathbf{X}(k+1) - \mathbf{X}(0) \\ \text{st. } \mathbf{X}(k+1) = \mathbf{X}(k) + \frac{\eta\lambda}{3 \cdot 600Q} [\mathbf{I}_{\text{cha}}(k) + \mathbf{I}_{\text{equ}}(k)] \\ 0.99 \leq \mathbf{X}(k+1) \leq 1.05 \\ \mathbf{Y}(k+1) + \mathbf{R}[\mathbf{I}_{\text{cha}}(k) + \mathbf{I}_{\text{equ}}(k)] = \mathbf{Y}_m \\ \mathbf{Y}_m \leq \mathbf{Y}_{\text{max}} \\ \mathbf{I}_{\text{cha}}(k+1) \leq \mathbf{I}_{\text{cha}}^{\text{max}} \\ \sum_{k=1}^{N-1} [\mathbf{I}_{\text{cha}}(k) + \mathbf{I}_{\text{equ}}(k)]^T \mathbf{R} [\mathbf{I}_{\text{cha}}(k) + \mathbf{I}_{\text{equ}}(k)] \lambda \leq J_{\text{max}} \end{cases} \quad (3)$$

充电电流在式(3)模型中作为求解 SOC、端电压及能量损耗的变量出现, 是底层优化模型的约束变量。以充电时间 t 和充电电流作为决策变量, 结合实时状态更新来实现目标函数 SOC 增长量最小化。

步骤 3 以 $\frac{1}{\sqrt{n}} \|\mathbf{X}(k) - \mathbf{X}(0)\|$ 为判断依据,

进一步缩小充电时间范围。若满足依据, 则由 λ 代替 T_1 ; 若不满足依据, 则由 λ 代替 T_0 , 继续返回至步骤 1 迭代, 直到满足 $|T_0 - T_1| < \xi_1$ (ξ_1 为预设时间公差), 最后输出 λ 为最优充电时间。

3.2 梯度下降算法

采用梯度下降法求解式(3), 在求解目标函数的最小值时, 可以通过一步步的迭代求解得到最小化的目标函数和模型参数。

将底层模型求解转换为求解关于目标函数的梯度下降法问题。首先根据式(3)模型构建求解函数, 即

$$F[\mathbf{I}_{\text{cha}}(k)] = \mathbf{X}(k) + \frac{\eta\lambda}{3 \cdot 600Q} [\mathbf{I}_{\text{cha}}(k) + \mathbf{I}_{\text{equ}}(k)] - \mathbf{X}(0) \quad (4)$$

变量可微, 确定初值 $\mathbf{I}_{\text{cha}}(0)$ 及终止条件。从当前初始点触发, 沿着梯度方向作为搜索方向进行迭代。

对目标函数 F 求导,求得梯度方向 ∇F 为

$$\nabla F = \frac{\eta\lambda}{3600Q} \quad (5)$$

$$I_{\text{cha}}(k) \leq \frac{Y_{\text{max}} - Y(k+1)}{R} - I_{\text{equ}}(k) \quad (6)$$

$$I_{\text{cha}}(k) \leq I_{\text{cha}}^{\text{max}} \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^{N-1} [I_{\text{cha}}(k) + I_{\text{equ}}(k)]^T R [I_{\text{cha}}(k) + I_{\text{equ}}(k)] \lambda \leq J_{\text{max}} \quad (8)$$

初始变量 $I_{\text{cha}}(0)$ 沿着负求导方向以步长 α 为变化量改变变量值,同时根据式(6)~式(8)中的约束限制得到 $I_{\text{cha}}(1)$,并更新目标函数 F 。当梯度方向 ∇F 趋近于 0 时,目标函数趋近于最小值。设定阈值 ξ_2 ,当 $|\nabla F| > \xi_2$ 时,继续进行迭代,否则将变量继续沿梯度方向变化,将下一个 $F[I(N+1)]$ 看作目标函数($I(N+1)$ 为经过 N 次迭代后的充电电流),不断迭代;当 $|\nabla F| \leq \xi_2$ 时,停止迭代,输出此时的充电电流。具体过程如图 5 所示,据此流程进行迭代计算。

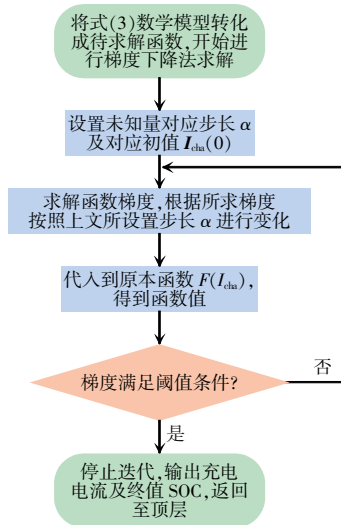


图 5 梯度下降法流程

Fig. 5 Flow chart of gradient descent method

4 仿真验证

4.1 模型分层求解

通过 MATLAB 软件验证所提均衡充电的最优化策略。考虑到串联电池较少出现无法验证模块化

均衡充电策略的情况,而 8 个电池 4 个模块足以说明验证所提均衡充电策略,因此采用 8 个单体电池串联而成的锂电池组作为研究对象。考虑到 CPC 均衡系统的 2 层控制,为了能够直观地观测到模块内均衡系统和模块间均衡系统的具体变化,选择每 2 个单体电池作为 1 个模块进行均衡充电。锂电池初始参数,如表 1 所示。本文选用二阶 RC 模型作为等效电池模型,等效电路模型中的欧姆电阻 R_1 、极化电阻 R_{p1} 和 R_{p2} 、极化电容 C_{p1} 和 C_{p2} 通过与 SOC 的参数辨识数据获得,如表 2 所示。

表 1 锂电池初始参数

Tab. 1 Initial parameters for lithium batteries

电池	初始 SOC/%	初始端电压/V
锂电池 1	15	3.420
锂电池 2	30	3.300
锂电池 3	0	2.890
锂电池 4	20	3.262
锂电池 5	18	3.256
锂电池 6	22	3.301
锂电池 7	25	3.357
锂电池 8	28	3.405

表 2 锂电池参数辨识

Tab. 2 Identification of parameters for lithium batteries

SOC/%	OCV/%	R_1/Ω	R_{p1}/Ω	$C_{p1}/10^{-3}\text{F}$	R_{p2}/Ω	$C_{p2}/10^{-3}\text{F}$
0.1	2.534 0	0.007 40	7.096	16 792.0	0.108 37	16 728
0.2	3.220 0	0.007 70	4.832	27 761.2	0.134 30	12 174
0.3	3.262 0	0.008 07	7.859	44 334.0	0.128 52	28 786
0.4	3.296 5	0.007 85	7.919	19 509.0	0.115 85	15 307
0.5	3.304 0	0.008 14	7.496	22 940.0	0.131 56	14 714
0.6	3.306 0	0.008 59	6.647	42 591.9	0.125 04	16 199
0.7	3.312 0	0.009 33	8.407	14 638.9	0.155 11	25 135
0.8	3.339 0	0.009 62	10.800	12 167.4	0.184 81	15 329
0.9	3.342 0	0.009 48	32.444	54 960.0	0.293 70	4 982

模块内和模块间均衡系统采用 Cuk 电路,通过观察电流变化判断均衡效果。设置电池预期 SOC 终值为 99%,将公差 $\xi_1=0.5\%$ 、 $\xi_2=60\text{ s}$ 代入到仿真中最优化程序进行运算。

4.2 仿真结果分析

为了验证所提最优化均衡充电策略的可行性,将其与传统非模块化均衡充电策略进行对比。传统

充电方式为恒流-恒压,均衡方式为 CTC 均衡。目前市场上锂电池容量为 1 800~3 600 mAh,本文选择容量为 2 000 mAh 的锂电池为研究对象,其充电方式是以 2 A 的充电电流进行充电为主。传统充电策略是以恒定不变的电流进行充电,难以做到实时数据传输及状态更新,不考虑电池组在充电过程中锂电池的能量损耗及电池承受极限。

4.2.1 充电时间对比分析

锂电池充电过程中充电电流的变化如图 6 所示,最优化策略下充电电流会根据电池组均衡充电过程不断优化,可见:在充电初期,充电电流先以 3 A 电流进行充电,随着充电时间不断增加,电池组中单体电池的电量不断增加;最优化策略下充电电流开始呈现阶梯状,匹配出当前电池组状态下的充电电流;在对锂电池组充电 47.52 min 后,充电电流下降为 0,充电完成。在传统充电策略下,采用恒流-恒压充电,在对锂电池组充电 58 min 后充电结束,与传统充电策略相比,本文所提最优化策略下的充电时间明显缩短。

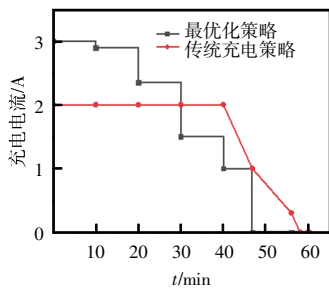


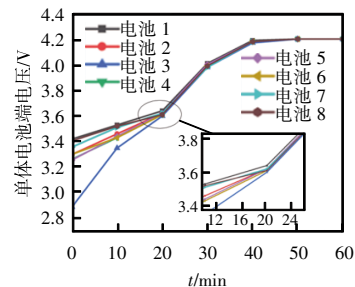
图 6 锂电池充电过程中充电电流的变化对比

Fig. 6 Comparison of charging current variation during lithium battery charging process

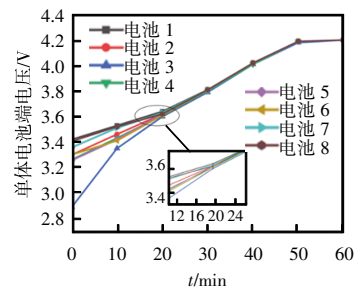
4.2.2 端电压对比分析

锂电池充电过程中端电压的变化如图 7 所示,可以通过锂电池端电压变化观测锂电池充电速度的变化。在图 7(a)中,约在 20 min 单体电池电压趋于一致,表示电池间的均衡完成,随着充电电流的改变,各单体电池端电压随时间不断增长,在 45 min 后增长速度明显下降;充电结束时,各单体电池端电压基本相等,均约为 4.2 V,表示电池达到最大电压,此时将充电电流降为 0,停止对电池组继续充电;与图 7(b)相比,特别是在 15~40 min,可以明显

观察到最优化策略充电电流下进行充电的锂电池组端电压变化曲线斜率大于传统均衡充电策略下锂电池端电压变化曲线斜率,即最优化策略充电电流下进行充电的锂电池组充电速度大于传统均衡充电策略下锂电池充电速度;在图 7(b)中,传统均衡策略下电池约在 50 min 达到最大电压 4.2 V,与之相比,最优化充电策略下电池达到最高电压的时间明显缩短。



(a) 本文所提最优化策略



(b) 传统均衡充电策略

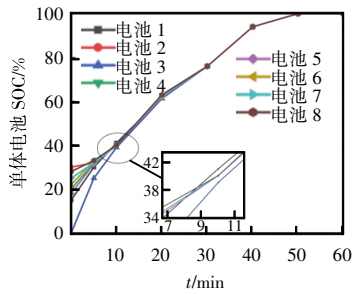
图 7 锂电池充电过程端电压变化

Fig. 7 Terminal voltage variation during lithium battery charging process

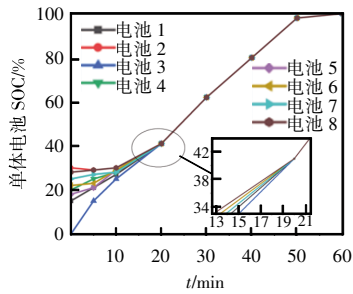
4.2.3 均衡时间对比分析

最优化策略下锂电池 SOC 变化如图 8(a)所示,电池在充电初期(0~15 min),SOC 开始变化,表示充电开始,均衡电路发挥作用,形成电池之间的能量传输,约在 13 min 均衡基本完成,随后电池组中单体电池 SOC 开始增长,增长速率近似相同。45 min 后充电结束,各个单体电池 SOC 基本相等,表示电池组电量充满,充电结束。图 8(b)为传统均衡充电策略,在 20 min 时均衡基本完成,随后继续充电至约 60 min,电池组 SOC 接近 100%。

由仿真结果可以得出,所提最优化快速充电策略可以在保证满足充电约束的同时使电池组的 SOC 在最短的充电时间内达到期望值。



(a)本文所提最优策略



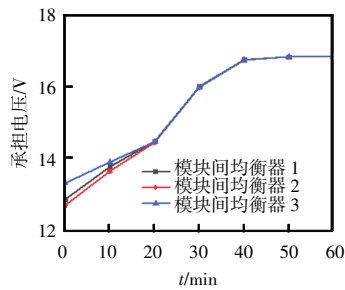
(b)传统均衡充电策略

图 8 锂电池充电过程 SOC 变化

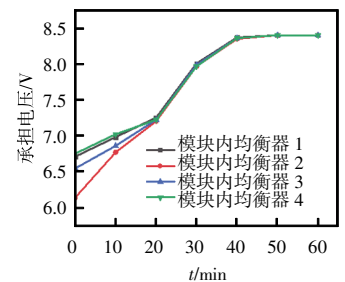
Fig. 8 SOC variation during charging process of lithium batteries

4.2.4 均衡模块承担电压对比分析

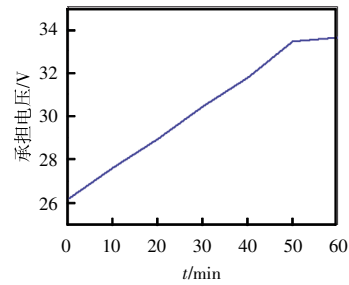
如图 9(a)和(b)所示,模块间均衡器承担电压不超过 16.8 V, 模块内均衡器承担电压不超过 8.5 V。CTC 均衡系统如图 9(c)所示,可见,在对 8 个电池进行均衡时,均衡器整体承担电压随充电时间不断增长,均衡器侧承担总电压最高可达 34 V;模块化 CPC 均衡系统能够减小均衡器所承担电压。



(a)模块间均衡器



(b)模块内均衡器



(c)CTC 均衡器

图 9 均衡器承担电压变化

Fig. 9 Equalizer voltage variation

如表 3 所示,通过与传统充电策略对比,能直观地观察到在模块化 CPC 的最优化策略下,不仅能够大幅度减少充电时间及均衡时间,还能够减少均衡器所承受的最大电压,具有可行性及优越性。

表 3 仿真结果对比

Tab. 3 Comparison of simulation results

充电策略	充电时间/min	达到均衡时间/min	单体电池端电压/V	均衡器最大承担电压/V
非模块化				
CTC 的恒流恒压策略	60	23	3.61	33.8
模块化 CPC 的最优化策略	50	12	3.65	模块内 8.5/ 模块间 16.8

5 结语

本文所提最优策略可以根据电池在充电过程中的 SOC 变化、单体电池端电压、电池能量损耗的实时状态,以最小化充电时间为目标实时更新充电电流和均衡电流。通过仿真对比分析证明,本文所提策略可以减少充电时间、均衡时间、均衡器承担电压,并且不增加单体电池端电压。

参考文献:

[1] 王彪,李永红,岳凤英. 电池管理系统研究与设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(14): 59-64.
Wang Biao, Li Yonghong, Yue Fengying. Research and design of battery management system [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(14): 59-64 (in Chinese).

- [2] 马春艳, 王庆龙, 张迪, 等. 基于SOC的串联连接锂电池能量均衡控制研究[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 216-223.
Ma Chunyan, Wang Qinglong, Zhang Di, et al. Energy balance control of series-connected lithium batteries based on SOC [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 216-223 (in Chinese).
- [3] 孟月, 李志扬, 朱建新, 等. 混动车电池管理系统硬件在环测试平台研究[J]. 现代电子技术, 2020, 43(8): 86-88, 92.
Meng Yue, Li Zhiyang, Zhu Jianxin, et al. Research on HIL testing platform of battery management system for hybrid vehicle [J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(8): 86-88, 92 (in Chinese).
- [4] 李弈, 张金龙, 漆汉宏, 等. 基于变分深度嵌入-带有梯度惩罚的生成对抗网络的锂离子电池老化特性建模[J]. 电工技术学报, 2024, 39(13): 4226-4239.
Li Yi, Zhang Jinlong, Qi Hanhong, et al. Ageing performance modeling of Li-ion batteries based on variational deep embedding-Wasserstein GAN with gradient penalty [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(13): 4226-4239 (in Chinese).
- [5] 张思而, 李旦, 张建秋, 等. 锂离子电池的等效时变内阻模型及应用[J/OL]. 仪器仪表学报, 2024: 1-10 (2024-07-03) [2024-07-23]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=kHMw6kznbpr0_ce1A1DqkANRlnwGNLBlhyvuwAbdHWZ_yTcGYeisL8sPr55sODT6DuNlanW6GGkSAOum04HzCvPc82KeMa3_fMnxGU7W-o5h1SLMsag08iAPx_oAYeAnWYWPilj_UoDt7C1Bs10neeWX4chUQyWxIOdn43VJ7GueubqnpCCr01ffge_h&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
Zhang Sier, Li Dan, Zhang Jianqiu, et al. Equivalent time varying internal resistance model and application of lithium ion batteries [J/OL]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024: 1-10 (2024-07-03) [2024-07-23]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=kHMw6kznbpr0_ce1A1DqkANRlnwGNLBlhyvuwAbdHWZ_yTcGYeisL8sPr55sODT6DuNlanW6GGkSAOum04HzCvPc82KeMa3_fMnxGU7W-o5h1SLMsag08iAPx_oAYeAnWYWPilj_UoDt7C1Bs10neeWX4chUQyWxIOdn43VJ7GueubqnpCCr01ffge_h&uniplatform=NZKPT&language=CHS (in Chinese).
- [6] 丁黎, 李帆, 蔡文嘉, 等. 锂离子电池的老化特性分析[J]. 电源技术, 2019, 43(1): 77-80.
Ding Li, Li Fan, Cai Wenjia, et al. Analysis on aging characteristics of lithium-ion batteries [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(1): 77-80 (in Chinese).
- [7] Han Weiji, Zhang Liang. Battery cell reconfiguration to expedite charge equalization in series-connected battery systems [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(1): 22-28.
- [8] Wan Lili, Chen Yan, Zhou Yang. Design of balanced charging circuit for lithium ion battery [C]// 2019 Chinese Control Conference (CCC). Guangzhou, China, 2019: 6476-6480.
- [9] Kirbiš G, Selčan D, Kos M, et al. High performance autonomous charge equalization in series connected batteries [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(1): 95-107.
- [10] Roy D, Narayanaswamy S, Pröbstl A, et al. Multi-stage optimization for energy-efficient active cell balancing in battery packs [C]// 2019 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD). Westminster, CO, USA, 2019: 1-8.
- [11] 胡晓亚, 郭永芳, 张若可. 锂离子电池健康状态估计方法研究综述[J]. 电源学报, 2022, 20(1): 126-133.
Hu Xiaoya, Guo Yongfang, Zhang Ruoke. Review of state-of-health estimation methods for lithium-ion battery [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(1): 126-133 (in Chinese).
- [12] Wang S C, Liu Yihua. A PSO-based fuzzy-controlled searching for the optimal charge pattern of Li-ion batteries [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 2983-2993.
- [13] Zhang Caiping, Jiang Jiuchun, Gao Yang, et al. Charging optimization in lithium-ion batteries based on temperature rise and charge time [J]. Applied Energy, 2017, 194: 569-577.
- [14] Ye Min, Gong Haoran, Xiong Rui, et al. Research on the battery charging strategy with charging and temperature rising control awareness [J]. IEEE Access, 2018, 6: 64193-64201.
- [15] Liu Kailong, Zou Changfu, Li Kang, et al. Charging pattern optimization for lithium-ion batteries with an electrothermal-aging model [J]. IEEE Transactions on Industri-

- al Informatics, 2018, 14(12): 5463-5474.
- [16] Zou Changfu, Hu Xiaosong, Wei Zhongbao, et al. Electrochemical estimation and control for lithium-ion battery health-aware fast charging [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6635-6645.
- [17] Feng Fei, Hu Xiaosong, Liu Jianfei, et al. A review of equalization strategies for series battery packs: Variables, objectives, and algorithms [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 116: 109464.
- [18] Wu Tiezhou, Ji Feng, Liao Li, et al. Voltage-SOC balancing control scheme for series-connected lithium-ion battery packs [J]. Journal of Energy Storage, 2019, 25: 100895.
- [19] Ouyang Quan, Han Weiji, Zou Changfu, et al. Cell balancing control for lithium-ion battery packs: A hierarchical optimal approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(8): 5065-5075.
- [20] Chen Yang, Liu Xiaofang, Cui Yangyi, et al. A multi-winding transformer cell-to-cell active equalization method for lithium-ion batteries with reduced number of driving circuits [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 4916-4929.
- [21] Shang Yunlong, Zhang Qi, Cui Naxin, et al. An optimized mesh-structured switched-capacitor equalizer for lithium-ion battery strings [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(1): 252-261.
- [22] Sun Qi, Quo Y. Research on equalization control strategy of marine lithium battery pack [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2137(1): 012020.
- [23] Shang Yunlong, Zhang Qi, Cui Naxin, et al. Multicell-to-multicell equalizers based on matrix and half-bridge LC converters for series-connected battery strings [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1755-1766.
- [24] Uno M, Yoshino K. Modular equalization system using dual phase-shift-controlled capacitively isolated dual active bridge converters to equalize cells and modules in series-connected lithium-ion batteries [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 2983-2995.
- [25] Pinto C, Barreras J V, Schaltz E, et al. Evaluation of advanced control for Li-ion battery balancing systems using convex optimization [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1703-1717.
- [26] Wang Shunli, Shang Liping, Li Zhanfeng, et al. Online dynamic equalization adjustment of high-power lithium-ion battery packs based on the state of balance estimation [J]. Applied Energy, 2016, 166: 44-58.



张嘉蕾

作者简介:

张嘉蕾(1988—),女,博士,讲师。研究方向:需求响应、新能源发电系统、电力变换器系统与储能系统。E-mail:zhangjialei@sxu.edu.cn。

王超宇(1999—),男,中国电源学会学生会员,硕士研究生。研究方向:电池管理系统。E-mail:202123504026@email.sxu.edu.cn。

樊郭宇(1999—),男,硕士研究生。研究方向:储能系统。E-mail:202123504040@email.sxu.edu.cn。

李悦(1999—),男,硕士研究生。研究方向:电力电子在电力系统中的应用。E-mail:202223503019@email.sxu.edu.cn。

吕高(1975—),男,通信作者,硕士,副教授。研究方向:电力物联网、电力电子在电力系统中的应用。E-mail:lygao@sxu.edu.cn。