

以容量利用率最大化为目标的电池储能系统 均衡电流分析

罗 芬, 凌志斌

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘 要: 分析电池不一致性的类型及其对容量利用率的影响, 推导在线动态单向均衡和在线动态双向均衡所需的最大均衡电流与工作场景的关系。随后以实际应用中的2种典型工况为例, 对比核算2种均衡方式所需均衡电流的大小。分析发现, 在线全区间双向均衡有更高的电池容量利用率, 且所需的均衡电流更小。

关键词: 电池均衡; 电池管理系统; 电池储能系统; 在线单向均衡; 在线双向均衡

中图分类号: TM912

文献标志码: A

0 引 言

电池储能技术是智能电网与电动汽车的核心之一。电池的不一致性在电池串并联过程中产生的短板效应导致的电池容量利用不完全和寿命缩短是阻碍电池储能应用的最大障碍之一, 需要电池管理系统提供辅助电路实现对电池的均衡功能。对电池均衡的研究主要集中在均衡电路拓扑、均衡控制方式和均衡效率优化上。文献[1-4]提出多种基于电池荷电状态(state of charge, SOC)均衡的控制算法; 文献[5]提出一种电池均衡的新拓扑, 通过电池并联 MOSFET 来达到控制电池均衡电流大小的目的, 提高了均衡效率; 文献[6]提出一种基于预测控制的均衡控制算法, 在得到当前均衡电流的同时可根据模型预测下一时刻的均衡电流; 文献[7]提出离线评估模型, 对在不同电池均衡拓扑和电池均衡控制方法下的电池运行性能进行评估。

总体而言, 鲜有研究涉及对电池均衡电流大小的探讨。在实际应用中, 电池运行过程中最大均衡电流的大小是决定电池均衡系统设计容量的重要因素。均衡电流的大小与均衡目标、均衡方式、均衡周期和电池工作场景等有关。目前, 电池均衡系统与实际应用中电池储能系统不匹配的现象普遍存在, 为了实现

系统的最优化设计, 本文以最大化电池容量利用率为目标, 分析对比在多种工作场景下, 在线全工作区间单向均衡和双向均衡所需的最大均衡电流, 为电池均衡系统的容量设计提供理论指导, 证明在线全区间双向均衡比单向均衡有更高的电池容量利用率且所需的均衡电流更小。

1 电池单体容量不一致性对容量利用率的影响

电池不一致性可能导致电池组中单体电池到达充电截止电压的时间不同, 为了保证电池的寿命, 一旦有电池到达截止电压, 充放电必须停止, 因此影响了电池组容量利用率。本文具体量化分析不一致单体电池对于电池组容量利用率的影响。在实际应用中, 电池可能存在串联/并联/混联等情况。对于并联电池组, 可通过控制支路充放电电流大小对各支路分别进行控制。为简化分析, 认为并联支路间容量不一致性互不影响, 下文只讨论串联情况下电池单体容量不一致性对容量利用率的影响。

假设单体电池到达充电截止电压时, SOC 为 1; 到达放电截止电压时, SOC 为 0。SOC 从 0 到 1 或从 1 到 0 的过程中流过的电量为电池容量。如图 1, 电池组由 N 个电池串联, 电池容量分别为 C_1, C_2, \dots, C_N , 各电

池的初始荷电状态分别为 $SOC_1, SOC_2, \dots, SOC_N$ 。假设某单体 i 的容量与其他单体不同, 为 C_i ($1 \leq i \leq N$), 其余电池单体容量为 C , 根据 C_i 和 C 的大小分 2 种情况进行分析。

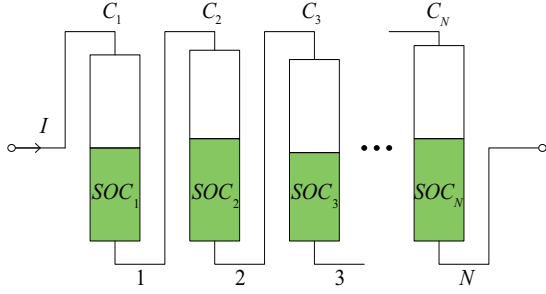


图1 电池串联系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of battery series system

1.1 某单体容量高于其他单体容量

当 $C_i > C$ 时, $C_i - C = \Delta C$, 则当所有电池单体初始 SOC 均为 0 或 1 时, 如不对电池组进行均衡, 电池组的充放电电量为 $N \cdot C$ 。总利用率为:

$$\eta = \frac{N \cdot C}{C_i + (N-1) \cdot C} = \frac{C}{C + \frac{1}{N} \Delta C} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta C}{N \cdot C}} \quad (1)$$

由于通常 C_i 略大于 C , ΔC 很小, 而 N 远大于 1, 因此 η 非常接近 1。单体电池容量偏大对整体的容量利用率影响不大。

1.2 某单体容量低于其他单体容量

当 $C_i < C$ 时, $C - C_i = \Delta C$, 则当所有电池单体初始 SOC 均为 0 或 1 时, 如不对电池组进行均衡, 电池组的充放电电量为 $N \cdot C_i$ 。总利用率为:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{N \cdot C_i}{C_i + (N-1) \cdot C} = \frac{C_i}{C_i - \frac{N-1}{N} \Delta C} \\ &= 1 + \frac{N-1}{N} \cdot \frac{\Delta C}{C} + \left(\frac{N-1}{N} \cdot \frac{\Delta C}{C} \right)^2 + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

忽略高次项, 可认为某电池单体容量偏小引起的整组电池利用率下降与偏差大小近似成正比。单体电池容量偏小对电池组容量利用率影响较大, 需通过均衡来保障电池组的整体容量。

2 电池均衡方式与均衡电流

电池均衡方式有多种分类: 根据均衡电路与主电路是否同时工作, 可分为在线均衡和离线均衡; 根据均衡过程中对能量的处理方式, 可分为能量耗散型和

能量转移型^[8]; 根据均衡电路的工作时间, 可分为末端均衡和全工作区间均衡^[9]。其中, 在线全工作区间均衡的时间效率较高, 是目前研究的热点。根据能量流动方向, 在线全工作区间又可分为单向均衡和双向均衡, 下文主要对在线全工作区间下的这 2 种均衡方式进行分析, 推导并比较 2 种均衡方式下所需的最大均衡电流。

2.1 在线全工作区间单向均衡

单向均衡时, 能量只能单向流动, 从单体电池流出, 或流入电池单体。从单体电池流出能量称为放电型均衡, 向单体电池流入能量称为充电型均衡。由于放电型均衡属于能量耗散型, 均衡效率不高, 本文重点分析效率较高的充电型单向均衡。对于充电型均衡, 为最大化容量利用率, 主电路放电时应使可能先放完电的电池通过均衡电路补电, 以达到所有电池同时放完电的均衡目标; 主电路充电时应使可能后充满电的电池通过均衡电路补电, 以达到所有电池同时充满电的均衡目标。

定义电池组中单体电池最大/小可充电电量为:

$$Q_{\max, c} = \max_{i=1, \dots, N} (1 - SOC_i) C_i \quad (3)$$

$$Q_{\min, c} = \min_{i=1, \dots, N} (1 - SOC_i) C_i \quad (4)$$

电池组中单体电池最大/小可放电电量为:

$$Q_{\max, f} = \max_{i=1, \dots, N} SOC_i \cdot C_i \quad (5)$$

$$Q_{\min, f} = \min_{i=1, \dots, N} SOC_i \cdot C_i \quad (6)$$

2.1.1 充电状态下的在线全工作区间单向均衡

引入可充电量峰-峰偏差系数 $k_{p-p, c}$:

$$k_{p-p, c} = \frac{\max_{i=1, \dots, N} (1 - SOC_i) C_i - \min_{i=1, \dots, N} (1 - SOC_i) C_i}{\min_{i=1, \dots, N} (1 - SOC_i) C_i} \quad (7)$$

由于能量是单向流动的, 为使电量最小单体的电量达到电量最大单体的电量, 均衡电路的最大充入电量为:

$$\Delta Q_{\max, c} = \max_{i=1, \dots, N} (1 - SOC_i) C_i - \min_{i=1, \dots, N} (1 - SOC_i) C_i \quad (8)$$

在充电过程中, 通过主电路的电量为 $Q_{\min, c}$, 单体电池通过主电路充电电流 I_c 为:

$$I_c = \frac{\min_{i=1, \dots, N} (1 - SOC_i) C_i}{t_c} \quad (9)$$

式中, t_c ——充电时间。

此时, 均衡电路对应最大均衡电流 I_b 为:

$$\begin{aligned}
I_b &= \frac{\Delta Q_{\max,c}}{t_c} \\
&= \frac{\max_{i=1,\dots,N} (1-SOC_i)C_i - \min_{i=1,\dots,N} (1-SOC_i)C_i}{t_c} \quad (10) \\
&= \frac{\min_{i=1,\dots,N} (1-SOC_i)C_i}{t_c} k_{p-p,c} = k_{p-p,c} \cdot I_c
\end{aligned}$$

2.1.2 放电状态下的在线全工作区间单向均衡

引入可放电量峰-峰偏差系数 $k_{p-p,f}$:

$$k_{p-p,f} = \frac{\max_{i=1,\dots,N} SOC_i C_i - \min_{i=1,\dots,N} SOC_i C_i}{\max_{i=1,\dots,N} SOC_i C_i} \quad (11)$$

在放电过程中,完全均衡时均衡电路的最大充入电量为:

$$\Delta Q_{\max,f} = \max_{i=1,\dots,N} SOC_i C_i - \min_{i=1,\dots,N} SOC_i C_i \quad (12)$$

在放电过程中,通过主电路放电电量为 $Q_{\max,f}$,单体电池通过主电路放电电流 I_f 为:

$$I_f = \frac{\max_{i=1,\dots,N} SOC_i C_i}{t_f} \quad (13)$$

式中, t_f ——放电时间。

此时,均衡电路对应最大均衡电流 I_b 为:

$$\begin{aligned}
I_b &= \frac{\Delta Q_{\max,f}}{t_f} \\
&= \frac{\max_{i=1,\dots,N} SOC_i C_i - \min_{i=1,\dots,N} SOC_i C_i}{t_f} \quad (14) \\
&= \frac{\max_{i=1,\dots,N} SOC_i C_i}{t_f} k_{p-p,f} = k_{p-p,f} \cdot I_f
\end{aligned}$$

从主电路流过的电荷量中可发现,单次充电中,充电型单向均衡电路对于主电路流过的电荷并无影响。

$$\begin{aligned}
Q_{\max,c} &= Q_{\text{avg},c} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1-SOC_i)C_i \\
&= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1-SOC_{\text{avg}} - \Delta SOC_i)(1+k_i)C_{\text{avg}} \\
&= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(1-SOC_{\text{avg}})(1+k_i)C_{\text{avg}} - \Delta SOC_i(1+k_i)C_{\text{avg}}] \\
&= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(1-SOC_{\text{avg}})C_{\text{avg}} + (1-SOC_{\text{avg}})k_i C_{\text{avg}} - \Delta SOC_i(1+k_i)C_{\text{avg}}] \\
&= (1-SOC_{\text{avg}})C_{\text{avg}} + (1-SOC_{\text{avg}})C_{\text{avg}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i - C_{\text{avg}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta SOC_i - C_{\text{avg}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta SOC_i k_i \\
&= (1-SOC_{\text{avg}})C_{\text{avg}} - C_{\text{avg}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta SOC_i k_i
\end{aligned} \quad (21)$$

则每个单体流过主电路的充电电流 I_c 为:

$$I_c = \frac{Q_{\text{avg},c}}{t_c} \quad (22)$$

这表明充电型均衡并不能增加充电过程中通过主电路流入电池的能量。同理,放电型单向均衡也不能增加放电过程中通过主电路流出电池的能量。这是单向均衡的局限。

2.2 在线全工作区间双向均衡

为了突破单向均衡的局限性,需实现能量在电池之间的双向流动,即双向均衡。定义双向均衡相关参数。

电池组的平均荷电状态:

$$SOC_{\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SOC_i \quad (15)$$

电池组的平均容量:

$$C_{\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \quad (16)$$

电池组中电池平均可充电电量:

$$Q_{\text{avg},c} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1-SOC_i)C_i \quad (17)$$

电池组中电池平均可放电电量:

$$Q_{\text{avg},f} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SOC_i C_i \quad (18)$$

引入容量偏差系数 k_i 和荷电状态偏差 ΔSOC_i :

$$C_i = (1+k_i)C_{\text{avg}} \quad (19)$$

$$SOC_i = SOC_{\text{avg}} + \Delta SOC_i \quad (20)$$

2.2.1 充电状态下在线全工作区间双向均衡

充电时,双向均衡功能的理想目标是使所有电池同时充满电,且均衡电路只负责搬运电量,本身并不提供或消耗电量,此时电池组中单体电池的充电电量为:

此时,均衡电路对第 i 个电池的转移电量 $Q_{e,i}$ 为该电池可充电容量与电池组平均可充电电量之差,则对应均衡电流 $I_{b,i}$ 为:

$$\begin{aligned}
I_{b,i} &= \frac{\Delta Q_{c,i}}{t_c} = \frac{(1 - SOC_i)C_i - Q_{avg,c}}{t_c} \\
&= \frac{(1 - SOC_{avg} - \Delta SOC_i)(1 + k_i)C_{avg} - Q_{avg,c}}{t_c} \\
&= \frac{(1 - SOC_{avg})(1 + k_i)C_{avg} - \Delta SOC_i(1 + k_i)C_{avg} - Q_{avg,c}}{t_c} \\
&= \frac{(1 + k_i)Q_{avg,c} - \Delta SOC_i(1 + k_i)C_{avg} - Q_{avg,c}}{t_c} \\
&= \frac{k_i Q_{avg,c} - \Delta SOC_i(1 + k_i)C_{avg}}{t_c} \\
&= k_i \cdot I_c - \frac{\Delta SOC_i(1 + k_i)C_{avg}}{t_c} \\
&= k_i \cdot I_c - \frac{\Delta SOC_i \cdot C_{avg}}{t_c} - \frac{\Delta SOC_i \cdot k_i \cdot C_{avg}}{t_c}
\end{aligned} \quad (23)$$

式中, ΔSOC_i ——荷电状态偏差系数,可通过均衡功能来调整; k_i ——容量偏差系数,在电池生产出来后即确定,之后随着时间和使用条件而变化,但无法通过均衡功能来改变。

因此,在第1次全充电或全放电完成后,荷电状态偏差系数 $\Delta SOC_i = 0$ 。在后续运行中,如忽略自放电率的影响,则对均衡能力的需求仅由容量偏差系数 k_i 决定,在本文第3节会详细分析。

2.2.2 放电状态下在线全工作区间双向均衡

考虑放电时进行均衡的情况。均衡完成时,电池组放电电量为:

$$\begin{aligned}
Q_{max,f} &= Q_{avg,f} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SOC_i C_i \\
&= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (SOC_{avg} + \Delta SOC_i)(1 + k_i)C_{avg} \\
&= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [SOC_{avg}(1 + k_i)C_{avg} + \Delta SOC_i(1 + k_i)C_{avg}] \\
&= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [SOC_{avg} C_{avg} + SOC_{avg} k_i C_{avg} + \Delta SOC_i(1 + k_i)C_{avg}] \\
&= SOC_{avg} C_{avg} + SOC_{avg} C_{avg} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i + \\
&\quad C_{avg} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta SOC_i + C_{avg} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta SOC_i k_i \\
&= SOC_{avg} C_{avg} + C_{avg} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta SOC_i k_i
\end{aligned} \quad (24)$$

则每个电池单体流过主电路的放电电流 I_f 为:

$$I_f = \frac{Q_{avg,f}}{t_f} \quad (25)$$

在放电过程中,均衡电路对第 i 个电池的转移电量 $Q_{f,i}$ 为该电池可放电电量与电池组平均可放电电量之

差,则对应均衡电流 $I_{b,i}$ 为:

$$\begin{aligned}
I_{b,i} &= \frac{\Delta Q_{f,i}}{t_f} = \frac{SOC_i C_i - Q_{avg,f}}{t_f} \\
&= \frac{(SOC_{avg} + \Delta SOC_i)(1 + k_i)C_{avg} - Q_{avg,f}}{t_f} \\
&= \frac{SOC_{avg}(1 + k_i)C_{avg} + \Delta SOC_i(1 + k_i)C_{avg} - Q_{avg,f}}{t_f} \\
&= \frac{(1 + k_i)Q_{avg,f} + \Delta SOC_i(1 + k_i)C_{avg} - Q_{avg,f}}{t_f} \\
&= \frac{k_i Q_{avg,f} + \Delta SOC_i(1 + k_i)C_{avg}}{t_f} \\
&= k_i \cdot I_f + \frac{\Delta SOC_i(1 + k_i)C_{avg}}{t_f} \\
&= k_i \cdot I_f + \frac{\Delta SOC_i \cdot C_{avg}}{t_f} + \frac{\Delta SOC_i \cdot k_i \cdot C_{avg}}{t_f}
\end{aligned} \quad (26)$$

充放电2种情况下,双向均衡方式的主电路电流和均衡电流存在符号相反的项,这是因为充电时以流入电池为正方向,放电时以流出电池为正方向。

3 运行场景与均衡目标

根据均衡电路与电池储能系统主电路工作循环之间的时间关系,电池均衡电路可能工作于不同的运行场景。不同运行场景对应不同的充放电策略。通过对不同充放电策略的分类讨论可进一步明确不同场景下对均衡电流的需求。下文主要对实际应用中常见的运行前初始均衡、运行中容量差异均衡、运行中维护型均衡,这3种均衡场景进行分析。

3.1 运行前初始均衡

运行前初始均衡是指在电池储能系统初次投运时,由于各种原因电池组内电池单体之间初始 SOC 差异较大,需对电池组进行一次初始均衡才能进入正常的运行状态。这种情况下均衡电流主要用来平衡 SOC 差异。为简化问题便于分析,以下讨论假设电池容量相同。

3.1.1 充电时单向均衡

假设每个电池容量相同,即有 $C_i = C, i = 1, 2, \dots, N$, 此时,可充电量峰-峰偏差系数 $k_{p-p,c}$ 化简为:

$$k_{p-p,c} = \frac{\max_{i=1, \dots, N} (1 - SOC_i) - \min_{i=1, \dots, N} (1 - SOC_i)}{\min_{i=1, \dots, N} (1 - SOC_i)} \quad (27)$$

主电路电流 I_c , 均衡电路对应最大均衡电流 I_b 可化简为:

$$I_c = \frac{\min_{i=1, \dots, N} (1 - SOC_i) C}{t_c} \quad (28)$$

$$I_b = k_{p-p,c} \cdot I_c = - \frac{\max_{i=1, \dots, N} SOC_i - \min_{i=1, \dots, N} SOC_i}{t_b} C \quad (29)$$

式中, t_b ——均衡时间。

3.1.2 放电时单向均衡

假设每个电池容量相同, 即有 $C_i = C$, $i = 1, 2, \dots, N$, 此时, 可充电量峰-峰偏差系数 $k_{p-p,f}$ 可化简为:

$$k_{p-p,f} = \frac{\max_{i=1,\dots,N} SOC_i - \min_{i=1,\dots,N} SOC_i}{\max_{i=1,\dots,N} SOC_i} \quad (30)$$

主电路电流 I_f , 均衡电路对应最大均衡电流 I_b 化简为:

$$I_f = \frac{\max_{i=1,\dots,N} SOC_i C}{t_f} \quad (31)$$

$$I_b = k_{p-p,f} \cdot I_f = \frac{\max_{i=1,\dots,N} SOC_i - \min_{i=1,\dots,N} SOC_i}{t_b} C \quad (32)$$

电池单体容量相同时, 若初始偏差状态相同且均衡时间相同, 那么充电时均衡和放电时均衡需求的最大均衡电流相同。这是因为均衡电路转移的电荷量为 2 个 SOC 差异最大的单体电池之间的电荷量之差, 而与充电还是放电状态无关。

3.1.3 充电时双向均衡

对于双向充电均衡, 由于 $k_i = 0$, 2.2.1 节中计算的充电电流 I_c 和最大均衡电流 I_b 可化简为:

$$I_c = \frac{Q_{avg,c}}{t_c} = \frac{(1 - SOC_{avg})C}{t_c} \quad (33)$$

$$I_b = \max_{i=1,\dots,N} I_{b,i} = -\max_{i=1,\dots,N} \frac{\Delta SOC_i \cdot C}{t_c} = -\frac{\max_{i=1,\dots,N} (SOC_i - SOC_{avg})}{t_b} C \quad (34)$$

3.1.4 放电时双向均衡

对于双向放电均衡, 由于 $k_i = 0$, 2.2.2 节中计算的放电电流 I_f 和最大均衡电流 I_b 可化简为:

$$I_f = \frac{Q_{avg,f}}{t_f} = \frac{SOC_{avg} C}{t_f} \quad (35)$$

$$I_b = \max_{i=1,\dots,N} I_{b,i} = \max_{i=1,\dots,N} \frac{\Delta SOC_i \cdot C}{t_f} = \frac{\max_{i=1,\dots,N} (SOC_i - SOC_{avg})}{t_b} C \quad (36)$$

比较式(34)和式(36)发现, 在 SOC 初始偏差状态相同时, 采用双向均衡方式所需的均衡电流更小。这是由于均衡电荷量从单体电池电荷最大与最小之间的差值缩减到了最大或最小电荷与电荷平均值的差值, 均衡电流最多可减少到原来的一半。需要指出的是, 相比于单向均衡, 双向均衡的电路结构和控制策略都更加复杂。

内蒙某风电场电池储能系统采用磷酸铁锂电池, 单体容量 15.5 Ah, 12 并 16 串构成 186 Ah/51.2 V 电池模组, 14 个电池模组串联形成电池组。电池管理系统对电池模组内单体实现均衡。现以其为例核算初始均衡对均衡能力的需求。

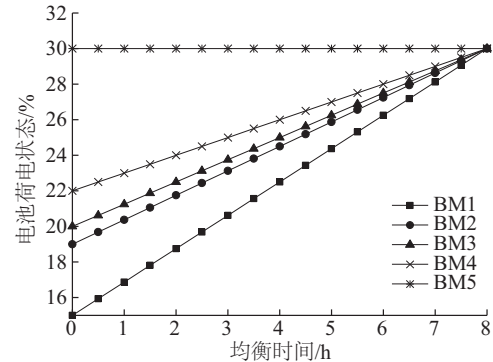
假设初次投运前电池单体之间 SOC 状态偏差最大值为 15%, 电池单体 SOC 与平均 SOC 偏差的最大值为 10%, 忽略电池容量间的差异, 单向均衡与双向均衡要转移的最大电荷量分别为 27.9 Ah 和 18.6 Ah。初次投运前的初始均衡时间人为确定, 不同均衡时间对应所需的最大均衡电流见表 1。由表 1 可知, 均衡时间越长, 所需的均衡电流越小; 在允许均衡时间相同的情况下, 双向均衡方式需求的均衡电流更小。

表 1 单向均衡与双向均衡对均衡能力需求的对比

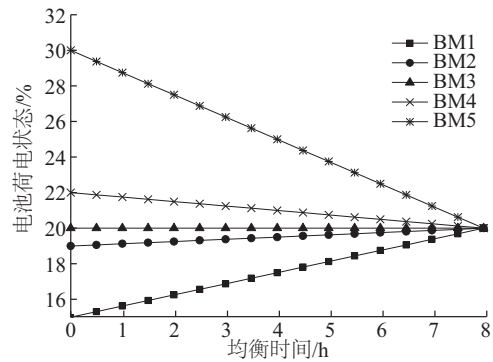
Table 1 Comparison of one-way equilibrium and two-way equilibrium on demand for balanced capacity

| 时间/h | 单向均衡需求电流/A | 双向均衡需求电流/A |
|------|------------|------------|
| 8 | 3.49 | 2.33 |
| 12 | 2.33 | 1.55 |
| 24 | 1.16 | 0.78 |
| 48 | 0.58 | 0.39 |

抽取系统中的 5 个电池组 (BM1~BM5) 分别记录 2 种均衡方式下电池组的 SOC 随均衡时间变化曲线, 如图 2 所示。



a. 单向均衡



b. 双向均衡

图 2 单/双向均衡时 SOC 随均衡时间变化曲线

Fig. 2 SOC curve during online single direction/bidirection balancing

3.2 运行中容量差异均衡

运行中容量差异均衡是指电池组在运行前初次均衡后,电池组在满充满放2种状态之间循环时所要做的均衡工作。这种均衡目标下,电池组的初始状态不存在SOC偏差(均为0或1),影响均衡电流的因素只有电池容量差异与均衡时间,故称之为容量差异均衡。

3.2.1 在线全工作区单向均衡

初始SOC均为0,则可充放电峰-峰偏差系数 $k_{p-p,c}$ 和 $k_{p-p,f}$ 分别为:

$$k_{p-p,c} = \frac{\max_{i=1,\dots,N} C_i - \min_{i=1,\dots,N} C_i}{\min_{i=1,\dots,N} C_i} \quad (37)$$

$$k_{p-p,f} = \frac{\max_{i=1,\dots,N} C_i - \min_{i=1,\dots,N} C_i}{\max_{i=1,\dots,N} C_i} \quad (38)$$

则充放电主电路电流 I_c 和 I_f ,均衡电路对应最大均衡电流 I_b 为:

$$I_c = \frac{\min_{i=1,\dots,N} C_i}{t_c} \quad (39)$$

$$I_f = \frac{\max_{i=1,\dots,N} C_i}{t_f} \quad (40)$$

$$I_b = k_{p-p,c} \cdot I_c = k_{p-p,f} \cdot I_f = \frac{\max_{i=1,\dots,N} C_i - \min_{i=1,\dots,N} C_i}{t_b} \quad (41)$$

这里把充电状态和放电状态放在一起讨论是因为在正常工况均衡时,不管充电还是放电,均衡电路流过的最大电荷量相等,均为该容量最大电池单体与容量最小电池单体的容量差,式(41)也证明了这一点。

3.2.2 在线全工作区双向均衡

对于在线全工作区双向均衡,由于 $SOC_i = 0$,2.2节中计算的充电电流和最大均衡电流为:

$$I_b = \max_{i=1,\dots,N} I_{b,i} = \max_{i=1,\dots,N} k_i \cdot I_{c/f} = \frac{\max_{i=1,\dots,N} (C_i - C_{avg})}{t_b} \quad (43)$$

这里也把双向均衡的充放电状态放在一起讨论,原因与上面所述的单向均衡时相同。对比式(41)和式(43)可看出,在容量差异均衡中,双向均衡的均衡电流仍小于单向均衡。另外,电池组容量的利用率也是评价均衡方法的一个指标。将1次充电和1次放电看成一个完整周期,双向均衡流过主电路的总电量大于单向均衡,所以总的来说,双向均衡方式的电池组容量利用率更高。

下文以上述电池储能系统在削峰填谷模式下的运行为背景核算运行中容量差异对所需均衡电流的影响。假设2种典型工况:工况1,储能系统凌晨进行8h充电直到满充,上午用电高峰时进行2h的放电,释放50%电量,经3h后,到下午用电高峰时再进行2h的放

电直到放完。该工况下,放电状态时,主电路工作时间是4h,均衡电路工作时间为7h;工况2,储能系统进行连续充电4h和连续放电2h,一天进行2次充放电。

忽略初始SOC的不同,假设SOC全为0或全为1。假设电池单体之间的最大容量差为20%,容量最大的电池为110%标准容量,容量最小的电池为90%标准容量,电池平均容量为标准容量。选取容量最小和最大的电池组BM1、BM2,记录第1种工况电池放电情况下,2种均衡方式(SD代表单相均衡;BD代表双向均衡)对应的电池剩余电量随工作时间变化情况。从图3可看出,不管是双向均衡还是单向均衡,都能达到电池同时放完电的均衡目标。从图4可看出,在放电时,单向均衡流过主电路的电流要比双向均衡大。分别对2种工况下充放电时所需的均衡电流进行计算,得到了2种工况下单向均衡主电路电流、单向均衡需求最大均衡电流、双向均衡主电路电流和双向均衡需求最大均衡电流,结果如表2所示。

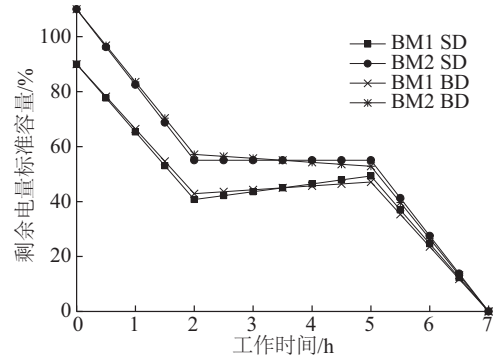


图3 在线单向和在线双向均衡方式下电池剩余电量随工作时间变化曲线

Fig. 3 Remaining capacity curve during online single direction/bidirection balancing

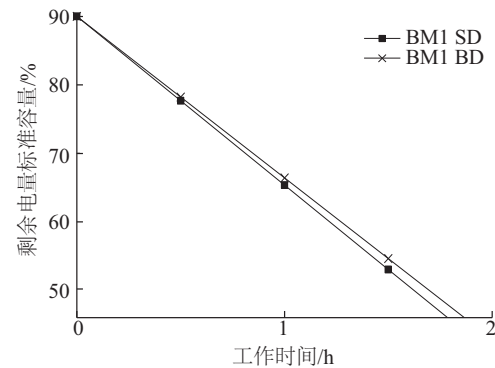


图4 BM1电池组剩余电量0~2h变化曲线

Fig. 4 Remaining capacity curve of BM1 in 0-2 h during online single direction/bidirection balancing

表2 电池容量差为20%时主电路电流与均衡电流

| Table 2 Maincircuit currents and balancing current maximum requiremenst in two typical scenariosat capacity difference is 20% | | | | | |
|---|----|-------------|--------------|-------------|--------------|
| 工况 | 状态 | 单向均衡主电路电流/A | 单向需求最大均衡电流/A | 双向均衡主电路电流/A | 双向需求最大均衡电流/A |
| 1 | 充电 | 20.93 | 4.65 | 23.25 | 2.33 |
| | 放电 | 51.15 | 5.31 | 46.50 | 2.65 |
| 2 | 充电 | 41.85 | 9.30 | 46.50 | 4.65 |
| | 放电 | 102.30 | 18.60 | 93.00 | 9.30 |

由表2可见,充电时,双向均衡在相同时间下,主电路电流更大,说明主电路流过的电量更多,容量利用率更高;双向均衡所需求的均衡电流更小。

3.3 运行中维护性均衡

在初始偏差均衡完成后,系统在运行过程中,由于单体电池之间自放电率等因素的差异,导致多次充放电之后,单体电池 SOC 又会出现微小的差异,定期对电池组进行维护性均衡可消除电池之间 SOC 差异的累积。维护性均衡本质与初始偏差均衡相同,均衡电流也可用初始偏差均衡的公式进行计算。储能电池自放电率通常较小,且与 SOC 有关。如锂电池自放电率一般为每月 2%~5%。自放电率不同引起的 SOC 偏差就更小,故维护性均衡所需的均衡电流也很小。同样以上述电池为例,按照 5%的月自放电率计算,自放电率差异即使达到 20%,每月所需均衡的电量也仅为 1.86 Ah。

4 结 论

本文从最大化容量利用率的角度出发,得到在线全工作区间单向均衡和双向均衡的最大均衡电流表达式,对比两者的优缺点,并进行实例验算。从上述理论研究和实例分析中可得出以下主要结论:

- 1)个别单体电池容量偏大对电池组容量利用率影响不大,个别单体电池容量偏小对电池组容量利用率有较大影响。
- 2)无论是单向均衡还是双向均衡,所需的均衡电流由储能系统的工作周期或工作间隔决定,工作周期或工作间隔长,则均衡时间长,所需均衡电流小,反之,所需均衡电流大。
- 3)无论是单向均衡还是双向均衡,所需均衡电流与电池单体容量差异的大小成正比。
- 4)对于具有相同一致性的电池组,采用双向均衡相比单向均衡所需均衡电流更小。

本文给出最大均衡电流关于电池容量、SOC 以及工作周期的数学关系,并分析 3 种常见的均衡场景下所需的最大均衡电流,希望对电池均衡管理系统容量设计

有一定的参考意义。

[参考文献]

[1] STUART T A, ZHU W. Modularized battery management for large lithium ion cells [J]. Journal of power sources, 2011, 196(1): 458-464.

[2] EINHORN M, GUERTLSCHMID W, BLOCHBERGER T, et al. A current equalization method for serially connected battery cells using a single power converter for each cell[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2011, 60(9): 4227-4237.

[3] CHENG K W E, DIVAKAR B P, WU H, et al. Battery-management system (BMS) and SOC development for electrical vehicles[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2011, 60(1): 76-88.

[4] 田春光, 田利, 李德鑫, 等. 基于混合储能系统跟踪光伏发电输出功率的控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 75-83.

TIAN C G, TIAN L, LI D X, et al. Control strategy for tracking the output power of photovoltaic power generation based on hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 75-83.

[5] GALLARDO-LOZANO J, ROMERO-CADAVAL E, JALAKAS T, et al. A battery cell balancing method with linear mode bypass current control [C]//Biennial Baltic Electronic Conference, Tallinn, Estonia, 2014.

[6] ZHENG L F, ZHU J G, WANG G X, et al. Model predictive control based balancing strategy for series-connected lithium-ion battery packs [C]//2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications, Warsaw, Poland, 2017.

[7] PINTO C, BARRERAS J V, SCHALTZ E, et al. Evaluation of advanced control for Li-ion battery balancing system using convex optimization[J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2016, 7(4): 1703-1717.

[8] 艾洪克, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 级联式储能系统中电

池自均衡控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 442-449.

AI H K, WU J Y, HAO L L, et al. Research on battery self-balancing control strategy in cascade energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical

Society, 2015, 30(14): 442-449.

[9] KONG Z G, ZHU C B, LU R G, et al. Comparison and evaluation of charge equalization technique for series connected batteries [C]//Power Electronics Specialists Conference, Jeju, Korea, 2006.

BALANCE CURRENT ANALYSIS OF BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM BASED ON CAPACITY UTILIZATION MAXIMIZATION

Luo Fen, Ling Zhibin

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In this paper, the types of battery inconsistency are described and its influence on capacity utilization are analyzed. The relationships between balancing current maximum requirement of online dynamic single direction balancing/bidirectional balancing and scenarios are derived. The balancing current maximum requirements under two balancing modes are calculated and compared based on two typical scenarios in practical application. The analysis shows that the online bidirectional balancing achieves higher battery capacity utilization and smaller balancing current maximum requirement.

Keywords: cell balancing; battery management system; battery energy storage system; online single direction balancing; online bidirectional balancing