DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.3.161 **中图分类号**：TM721.1 **文献标志码**：A

基于储能型 MMC 的 SOC 自适应均衡控制策略

曹 赛，王 毅，余欣洋，于义轩，余祖泳
(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学)，保定 071003)

摘要：为克服传统恒定均衡系数无法兼顾电池荷电状态SOC(state-of-charge)均衡速度和均衡环流的局限性，提出1种基于电池储能型模块化多电平换流器MMC-BESS(modular multilevel converter-battery energy storage system)的电池SOC自适应均衡优化控制策略。详细分析了MMC-BESS桥臂内的功率成分，对基于DC-DC侧电池功率直接控制的SOC均衡控制器进行了优化设计，在恒定比例均衡系数的基础上引入了标准差因子，改进了相间-桥臂间-桥臂内级联式SOC均衡策略，该策略能够根据各模块SOC差异自适应确定比例均衡系数。此外，在DC-DC控制器的功率外环中增加了1个前馈量以提升电池功率充放电的响应速度。基于MATLAB/Simulink的仿真结果表明，所提SOC均衡控制策略能够减小均衡初期的环流并缩短总的均衡时间。

关键词：电池储能型模块化多电平换流器；电池功率控制；荷电状态均衡；自适应均衡系数

Adaptive Balance Control Strategy for SOC Based on MMC-BESS

CAO Sai, WANG Yi, YU Xinyang, YU Yixuan, YU Zuyong
(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The use of traditional constant balance coefficient for the state-of-charge (SOC) of batteries cannot reach a compromise between the balancing speed and circulating current. To overcome this limitation, an adaptive balance optimization control strategy for battery SOC is proposed, which is based on modular multilevel converter-battery energy storage system (MMC-BESS). A detailed analysis of the power components within the MMC-BESS bridge arm is given, and the design of an SOC equalization controller based on direct control of battery power on the DC-DC side is optimized. A standard deviation factor based on a constant proportional balance coefficient is introduced, and the interphase-interarm-intraarm cascaded SOC balance algorithm is improved, which can adaptively determine the proportional balance coefficient according to the SOC difference in each module. In addition, a feedforward control quantity is added to the outer power loop of the DC-DC controller, so as to improve the response speed of battery power charging and discharging. The simulation results based on MATLAB/Simulink show that the proposed SOC balance control strategy can reduce the circulating current at the initial stage of balance and shorten the total balance time.

Keywords: Modular multilevel converter-battery energy storage system (MMC-BESS); battery power control; state-of-charge (SOC) balance; adaptive balance coefficient

收稿日期：2023-08-16；**修回日期**：2023-10-31；**录用日期**：2023-11-17；**网络首发日期**：2024-02-08
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52077079)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52077079

电池储能系统BESS(battery energy storage system)具有双向调节能力，响应速度快、能源利用率高，在新型电力系统中得到了广泛应用[1-2]。随着电压等级、额定容量的提升，大功率两电平储能变流器中并联的电池数量也会大量增加，这种连

接结构会导致系统可靠性下降[3]。文献[4]提出了基于模块化多电平换流器的电池储能系统 MMC-BESS(modular multilevel converter-BESS)，因其电池储能单元能够分散接入到桥臂内的子模块中，并且能够运行在较低电压，因此 MMC-BESS 更适合于高电压大功率场合。每个电池单元与子模块之间采用 DC-DC 变换器可以降低电磁干扰和 MMC 侧流入到电池的二次谐波，同时能将交流功率、直流功率以及电池功率解耦，为储能系统提供了更多的控制自由度[5-6]。

MMC-BESS 具有大量的电池模块，电池的容量利用率受到其电池荷电状态 SOC(state-of-charge)限制，因此电池的 SOC 均衡控制是储能系统稳定运行的最重要的问题之一[7-8]。文献[9]首次提出了基于 MMC-BESS 的相间-桥臂间-桥臂内级联式 SOC 均衡控制结构，通过对桥臂功率的解析式进行分析，指出相间和桥臂间的 SOC 均衡可分别通过控制环流的交流、直流分量实现；文献[10-11]基于级联式控制，通过比例-积分 PI(proportional integral)实现 SOC 均衡，但该控制方式会影响电池的总功率；为了保证 MMC-BESS 在 SOC 均衡时不影响系统整体输出的功率，文献[12-15]采用了基于 SOC 差值的纯比例功率注入的方式来均衡，同时说明了比例均衡系数与 SOC 均衡速度的关系呈正相关；文献[16]依据开关器件的耐流能力，对比例均衡系数做了定量分析，给出了均衡系数的选取原则。但目前已有的文献采用的恒定均衡系数法存在着无法兼顾均衡速度和均衡环流的局限性，比例系数大，会带来过大的环流；比例系数小，会降低 SOC 均衡速度。当电池组初始 SOC 差异巨大时，SOC 均衡的时间尺度可达小时级，该过程中较大均衡环流造成换流器的对外输出容量受限，这削弱了电力系统发生功率缺额时电池储能系统实现快速功率支撑的效果。

为提升 MMC-BESS 在电力系统应用的优势，本文将从提升 SOC 均衡速度和限制均衡环流的角度进行研究。首先给出 MMC-BESS 的系统拓扑及工作原理，对换流器桥臂功率构成成分进行分析，设计基于电池功率直接控制的 SOC 均衡策略，并改进电池功率控制结构。然后，引入标准差衡量 SOC 的差异，得到自适应均衡系数，提出 1 种电池 SOC 自适应均衡策略。最后，利用 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型对所提策略的有效性和可行性进行验证。

1 MMC-BESS 拓扑与工作原理

储能型 MMC-BESS 主电路拓扑如图 1 所示，MMC-BESS 分为 3 个相单元，每个相单元由上、下 2 个桥臂组成，并且每个桥臂由 N 个含储能电池

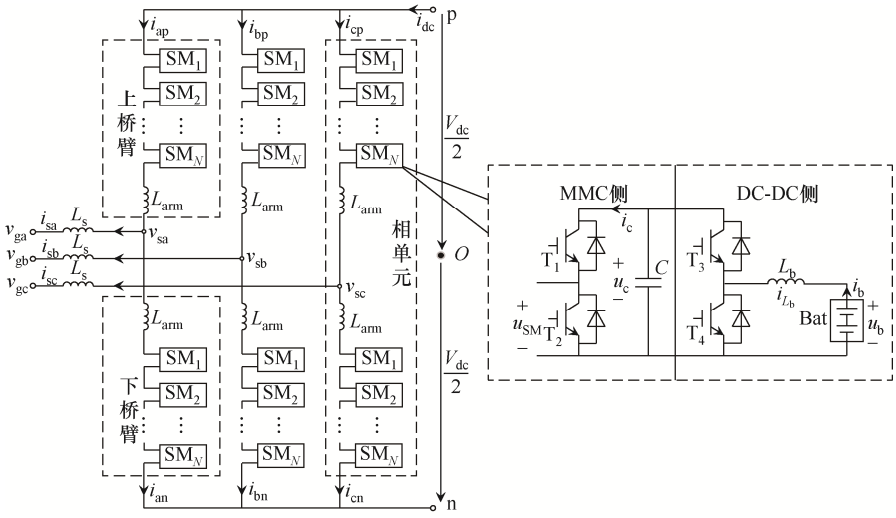


图 1 MMC-BESS 结构示意

Fig. 1 Schematic of structure of MMC-BESS

的开关模块 SM(switch module)和 1 个桥臂电抗 $L_{\rm arm}$ 串联组成，从每相桥臂中间引出输出端，经换流变压器连接至电网，变压器的电感为 $L_{\rm s}$。每个 SM 由半桥子模块 HBSM(half-bridge SM)和电池组成，它们之间通过非隔离双向 DC-DC 变换器连接。图中：$v_{\rm ga}$、$v_{\rm gb}$、$v_{\rm gc}$ 为变压器网侧三相交流电压；$i_{\rm sa}$、$i_{\rm sb}$、$i_{\rm sc}$ 为三相交流电流；$i_{\rm ap}$、$i_{\rm bp}$、$i_{\rm cp}$ 为上桥臂三相电流；$i_{\rm an}$、$i_{\rm bn}$、$i_{\rm cn}$ 为下桥臂三相电流；$i_{\rm dc}$ 为直流侧电流；$V_{\rm dc}$ 为直流侧电压；$v_{\rm sa}$、$v_{\rm sb}$、$v_{\rm sc}$ 为变压器阀侧三相交流电压；$\rm T_1$、$\rm T_2$ 为 MMC 侧半桥子模块功率开关；$\rm T_3$、$\rm T_4$ 为电池侧 DC-DC 变换器开关；Bat 代表电池；C 为半桥子模块电容；$L_{\rm b}$ 为储能电池侧电感；$i_{\rm b}$ 为储能电池充放电电流；$i_{L_{\rm b}}$ 为储能电池侧电感电流；$u_{\rm b}$ 为储能电池输出端电压；$u_{\rm c}$ 为储能模块电容电压；$u_{\rm SM}$ 为储能模块端口电压。

DC-DC 变换器是 MMC 型储能系统的关键结构，非隔离型双向 DC-DC 变换器可以看作是由单相 Buck 和 Boost 电路组合而成。为实现电池和电容之间的能量双向流动，本文采用互补 PWM 控制 DC-DC 变流器。在任一时刻，无论功率方向，上、下 2 个开关管均工作于 PWM 状态，在 1 个开关周期内互补导通，即假设开关 $\rm T_3$ 占空比为 D，则 $\rm T_4$ 的占空比为 $1-D$，而功率传输方向取决于电池电流的正负。

2　MMC 直流侧桥臂功率分析

与普通 MMC 相比，MMC-BESS 直流侧桥臂内存在 3 种功率，即交流功率、直流功率和电池功率，并且每个电池功率均为独立的变量，因此有必要对桥臂的功率进行分析。根据功率守恒原则有

$$P_{\rm dc}+P_{\rm ac}+P_{\rm b}=0 \tag{1}$$

式中：$P_{\rm dc}$ 为直流功率；$P_{\rm ac}$ 为交流功率；$P_{\rm b}$ 为电池功率。

根据 MMC 基本工作原理，以 a 相为例，由基尔霍夫电压定律 KVL(Kirchhoff's voltage law)可得

$$\begin{cases}\dfrac{V_{\rm dc}}{2}-v_{\rm ap}-L_{\rm arm}\dfrac{{\rm d}i_{\rm ap}}{{\rm d}t}=L_{\rm s}\dfrac{{\rm d}i_{\rm sa}}{{\rm d}t}+v_{\rm ga}\\ -\dfrac{V_{\rm dc}}{2}+v_{\rm an}+L_{\rm arm}\dfrac{{\rm d}i_{\rm ap}}{{\rm d}t}=L_{\rm s}\dfrac{{\rm d}i_{\rm sa}}{{\rm d}t}+v_{\rm ga}\end{cases} \tag{2}$$

式中，$v_{\rm ap}$、$v_{\rm an}$ 分别为 a 相上、下桥臂的电压。

忽略电感压降，则可以得到 a 相上、下桥臂的电压表达式分别为

$$\begin{cases}v_{\rm ap}\approx\dfrac{V_{\rm dc}}{2}-v_{\rm ga}=\dfrac{V_{\rm dc}}{2}-V_{\rm ga}\cos(\omega t)\\ v_{\rm an}\approx\dfrac{V_{\rm dc}}{2}+v_{\rm ga}=\dfrac{V_{\rm dc}}{2}+V_{\rm ga}\cos(\omega t)\end{cases} \tag{3}$$

式中，$V_{\rm ga}$ 和 ω 分别为交流出口电压幅值和相位。

由于二次及以上的谐波对功率传输无影响，因此仅考虑桥臂内环流的直流分量和基频分量，则环流 $i_{\rm ca}$ 可表示为

$$i_{\rm ca}=I_{\rm dca}+i_{\rm 1a}=I_{\rm dca}+I_{\rm 1a}\cos(\omega t+\phi) \tag{4}$$

式中：$I_{\rm dca}$ 为环流直流分量；$i_{\rm 1a}$ 为环流基频分量；$I_{\rm 1a}$ 和 ϕ 分别为环流基频分量的幅值和相位。

由基尔霍夫电流定律 KCL(Kirchhoff's current law)可得 a 相上、下桥臂电流分别为

$$\begin{cases}i_{\rm ap}=\dfrac{i_{\rm ga}}{2}+i_{\rm ca}=\dfrac{I_{\rm ga}}{2}\cos(\omega t+\varphi)+I_{\rm dca}+\\ \qquad I_{\rm 1a}\cos(\omega t+\phi)\\ i_{\rm an}=-\dfrac{i_{\rm ga}}{2}+i_{\rm ca}=-\dfrac{I_{\rm ga}}{2}\cos(\omega t+\varphi)+I_{\rm dca}+\\ \qquad I_{\rm 1a}\cos(\omega t+\phi)\end{cases} \tag{5}$$

式中：$i_{\rm ga}$ 为交流电流；$I_{\rm ga}$ 和 φ 分别为交流电流的幅值和相位。

根据式(3)和式(5)，可得在 1 个基频周期内上、下桥臂的平均功率分别为

$$\begin{cases}P_{\rm ap}=\dfrac{\int_{t_0}^{t_0+T}v_{\rm ap}\,i_{\rm ap}{\rm d}t}{T}=\dfrac{1}{2}V_{\rm dc}I_{\rm dca}-\dfrac{1}{2}V_{\rm ga}I_{\rm ga}\cos\varphi-\\ \qquad\dfrac{1}{2}V_{\rm ga}I_{\rm 1a}\cos\phi\\ P_{\rm an}=\dfrac{\int_{t_0}^{t_0+T}v_{\rm an}\,i_{\rm an}{\rm d}t}{T}=\dfrac{1}{2}V_{\rm dc}I_{\rm dca}-\dfrac{1}{2}V_{\rm ga}I_{\rm ga}\cos\varphi+\\ \qquad\dfrac{1}{2}V_{\rm ga}I_{\rm 1a}\cos\phi\end{cases} \tag{6}$$

式中：T 为基频周期；t_0 为某一时刻。

a 相直流功率 $P_{\mathrm{dca}}=V_{\mathrm{dc}}I_{\mathrm{dca}}$；a 相交流功率 $P_{\mathrm{aca}}=V_{\mathrm{ga}}I_{\mathrm{ga}}\cos\varphi$；$a$ 相上、下桥臂功率差 $P_{\mathrm{a,pn}}=V_{\mathrm{ga}}I_{1\mathrm{a}}\cos\phi=(P_{\mathrm{an}}-P_{\mathrm{ap}})$。

当 MMC-BESS 交流侧三相电压和交流功率平衡时，可以得出以下结论：环流直流分量 I_{dc} 决定了每相的直流功率，若各相的电池功率不平衡，则直流环流也相应不平衡，因此直流环流决定了相间功率的平衡；上、下桥臂功率差即为电池功率差，因此环流基频分量决定了各相上、下桥臂间功率的平衡。MMC-BESS 的相间及上、下桥臂间的功率平衡可以分别通过环流直流分量和基频分量控制，这为后续 SOC 均衡控制提供了理论依据。

3 自适应 SOC 均衡控制器设计

3.1 级联式 SOC 均衡控制

根据相间-桥臂间-子模块间的级联式 SOC 均衡控制模式，定义 k(k=a, b, c)相的 j(j=p, n)桥臂中第 i 个子模块的荷电状态为 SOC_{kji}，那么 k 相 j 桥臂中 N 个子模块的平均荷电状态 SOC_{kj}、k 相中 $2N$ 个子模块的平均荷电状态 SOC_k、整个系统所有子模块的平均荷电状态 $\mathrm{SOC}_{\mathrm{avg}}$ 可以分别表示为

$$\begin{cases}\mathrm{SOC}_{kj}=\dfrac{1}{N}\displaystyle\sum_{i=1}^{N}\mathrm{SOC}_{kji}\\ \mathrm{SOC}_{k}=\dfrac{\mathrm{SOC}_{k\mathrm{p}}+\mathrm{SOC}_{k\mathrm{n}}}{2}\\ \mathrm{SOC}_{\mathrm{avg}}=\dfrac{\mathrm{SOC}_{\mathrm{a}}+\mathrm{SOC}_{\mathrm{b}}+\mathrm{SOC}_{\mathrm{c}}}{2}\end{cases}\tag{7}$$

当所有电池的 SOC 均衡时，每个电池的功率应该相等，SOC 均衡算法产生的不平衡功率应该为 0。以相间 SOC 均衡控制为例，当某相单元整体的 SOC_k 偏大时，应该向其注入负的不平衡功率；当某相单元整体的 SOC_k 偏小时，应该向其注入正的不平衡功率。通过上述不平衡功率注入，可以使相间的 SOC_k 趋于一致。为了不影响电池的总功率输出，采用纯比例控制的方式得到不平衡功率。采用三级 SOC 均衡控制策略后的相间 SOC 均衡功率分量ΔP_k、上下桥臂间 SOC 均衡功率分量ΔP_{kj} 及桥臂内子模块间 SOC 均衡功率分量ΔP_{kji} 分别为

$$\begin{cases}\Delta P_k=(\mathrm{SOC}_{\mathrm{avg}}-\mathrm{SOC}_k)\alpha\\ \Delta P_{kj}=(\mathrm{SOC}_{\mathrm{avg}}-\mathrm{SOC}_{kj})\beta\\ \Delta P_{kji}=(\mathrm{SOC}_{\mathrm{avg}}-\mathrm{SOC}_{kji})\gamma\end{cases}\tag{8}$$

式中，α、β、γ 分别为相间、桥臂间及子模块间 SOC 比例均衡系数。

根据式(8)可得 k 相 j 桥臂的第 i 个子模块电池分配的总的用于 SOC 均衡的不平衡功率$\Delta P_{\mathrm{b}kji}$ 为

$$\Delta P_{\mathrm{b}kji}=\frac{\Delta P_k}{2N}+\frac{\Delta P_{kj}}{N}+\Delta P_{kji}\tag{9}$$

比例均衡系数 α、β 和 γ 决定了各级 SOC 的均衡速度，理论上期望 SOC 均衡速度越快越好。文献[16]说明了为保证相间完成 SOC 均衡先于桥臂间，α 一般按照 β 的 4 倍设计。在恒定的比例均衡系数下，即在整个均衡过程中 α、β 和 γ 保持不变。若电池组的 SOC 差异过大，则用于 SOC 均衡的电池不平衡功率会给系统持续注入过大的均衡环流，导致功率器件无法承受过大的电流而损坏；反之，若 SOC 差值过小，注入的均衡环流就会很小，无法消除稳态误差，难以实现 SOC 的快速和完全均衡。为了能够同时解决 SOC 均衡过程中比例环节所带来的器件电流超额和均衡速度过慢的问题，本文提出了 1 种基于自适应均衡系数的 SOC 均衡策略，具体构成如图 2 所示。图中：s 为总体标准差；a、b 为优化系数；x_i 为总体中每个数值；$\bar{x}$ 为总体均值。

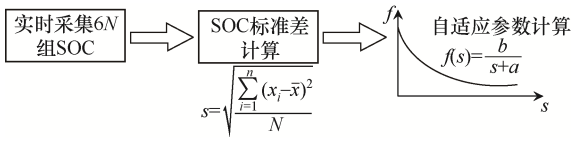


图 2 自适应均衡系数

Fig. 2 Adaptive balance coefficient

在离散数学中，标准差的计量单位和原来数

据的单位是一致的，更便于分析，因此采用标准差来衡量 SOC 的一致性程度。首先实时计算电池组 SOC 的差异程度并用标准差表示；然后根据系统 SOC 均衡的时间要求及器件所能承受的电流应力制定 SOC 标准差与自适应系数的反比例函数，将标准差 s 输入函数 $f(s)$中便可以得到自适应均衡系数 f; 最后将 f 与基本的恒定均衡系数 α_0、β_0 和 γ_0 相乘，得到最后的自适应SOC均衡比例系数为

$$\begin{cases}\alpha = f\alpha_0\\ \beta = f\beta_0\\ \gamma = f\gamma_0\end{cases} \tag{10}$$

相间、上下桥臂间及桥臂内子模块间的SOC均衡方式各不相同，若均采用基于所有子模块 SOC 标准差的自适应均衡系数，会出现某相桥臂内 SOC 未均衡，使得已经均衡的其他相或者桥臂仍要一直参与该相的 SOC 均衡，这会降低相间及桥臂间 SOC 均衡的速度。为此，三者可以采用不同的均衡标准差：相间均衡标准差 $s_\alpha=\sqrt{\dfrac{\sum\limits_{k=\mathrm{a、b、c}}(\mathrm{SCO}_k-\mathrm{SOC}_{\mathrm{avg}})^2}{3}}$，桥臂间均衡标准差 $s_\beta=\sqrt{\dfrac{\sum\limits_{\substack{j=\mathrm{p、n}\\k=\mathrm{a、b、c}}}(\mathrm{SCO}_{kj}-\mathrm{SOC}_{\mathrm{avg}})^2}{6}}$，桥臂内均衡标准差 $s_\gamma=\sqrt{\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n}\sum\limits_{\substack{j=\mathrm{p、n}\\k=\mathrm{a、b、c}}}(\mathrm{SCO}_{kji}-\mathrm{SOC}_{\mathrm{avg}})^2}{6N}}$。

最终的自适应系数可将式(10)改写为

$$\begin{cases}\alpha = f_\alpha\alpha_0\\ \beta = f_\beta\beta_0\\ \gamma = f_\gamma\gamma_0\end{cases} \tag{11}$$

3.2 DC-DC 侧电池功率控制

在电池组 SOC 均衡时，DC-DC 变换器是电池不平衡功率注入的控制端口，也是整体控制系统中重要的一部分。该结构与直接在子模块电容两端并联电池的 MMC-BESS 相比，增加了额外的控制自由度，独立于 MMC 侧的控制，使得电池电压和电容电压解耦。实际中，储能系统能应用于多种场合，如调峰、调频等，这些均需电池系统对上级下达的功率指令作出快速响应。因此，本文设计了 1 种注入 SOC 不平衡功率下的 DC-DC 功率电流双闭环控制策略，在功率外环控制上增加了外环功率前馈补偿环节，让功率指令经比例环节后直接作用产生电流参考值。因为电池的电压波动很小，所以前馈比例系数可设置为 m=1/U_b，而已有的 PI 控制环节用于消除稳态误差。结合式(7)~式(11)，可以得到 SOC 均衡控制框图，如图 3 所示。图中：$\Delta P_{\mathrm{b}kji,\mathrm{ref}}$、$\Delta P_{\mathrm{b}kji,\mathrm{m}}$、$\Delta P_{\mathrm{b}kji}$ 分别为子模块不平衡功率的参考值、测量值、偏差值；$i_{\mathrm{b}kji,\mathrm{ref}}$、$i_{\mathrm{b}kji,\mathrm{m}}$、$i_{\mathrm{b}kji}$ 分别为子模块电池的电流参考值、测量值、偏差值；$d_{\mathrm{b}kji}$ 为子模块触发脉冲。本文实现 SOC 均衡的方式是基于 DC-DC 侧直接控制电池的不平衡功率，重点在于研究分析 SOC 均衡控制和电池功率控制，因此本文不再介绍 MMC 侧的控制策略，具体控制策略可参考文献[14]。

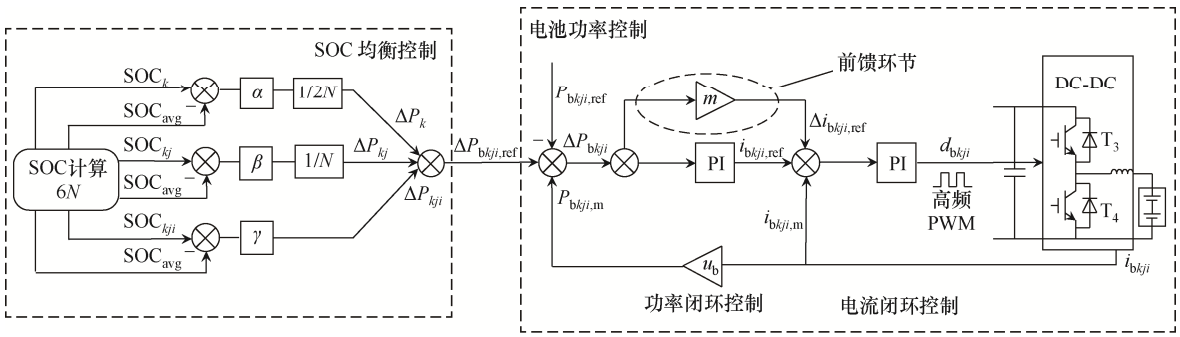


图 3　基于电池功率直接控制的 SOC 均衡策略

Fig. 3 Strategy for SOC balance based on direct control of battery power

4 算例分析

为了验证前文所提理论，在 MATLAB/Simulink 环境下搭建图 4 所示的三相 5 电平 MMC-BESS 模型，仿真模型参数见表 1。图 4 中，G 为无穷大交流电源；T_k 为换流变压器。为验证电池组的 SOC 均衡效果，将电池组的初始 SOC 值设置为分布于[60%, 80%]区间，考虑到 SOC 均衡的时间尺度为分钟级或小时级，仿真中需要长时间运行以观察 SOC 均衡效果。为提高仿真效率，在仿真开始时将电池组的容量设置为 0.5 A·h。

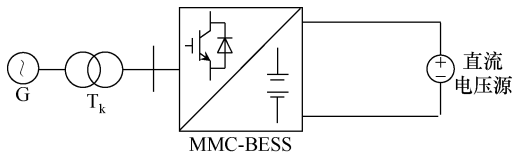


图 4 MMC-BESS 系统结构示意

Fig. 4 Schematic of structure of MMC-BESS system

表 1 主要仿真参数

Tab. 1 Main simulation parameters

参数	数值
基准容量 S/kVA	10
交流线电压有效值 U_s/V	200
直流母线电压 U_{dc}/V	400
桥臂电抗 L_{arm}/mH	2
桥臂子模块数量 N/个	4
子模块电容电压 U_c/V	100
电池容量 Q/(A·h)	1
电池基准电压 U_b/V	60
子模块电容 C/mF	3.3
相间均衡系数 α	800
桥臂间均衡系数 β	200
子模块间均衡系数 γ	100
反比例函数参数 a	0.5
反比例函数参数 b	1.5

设定 MMC-BESS 系统初始时的工况为交流有功功率 P_{ac}=6 kW、交流无功功率 Q_{ac}=0 kvar、电池功率 P_b=4 kW，即 MMC 处于整流状态，电池处于充电状态。在 1.05 s 时将电池功率翻转到−4 kW，即电池处于放电状态。由图 5 可以看出，交直流功率被解耦，3 个功率端口满足 $P_{dc}+P_b+P_{ac}=0$ 的功率守恒关系，在控制系统作用下的 MMC-BESS 具有良好的功率解耦效果；当系统接收大功率反转指令时，功率响应迅速。

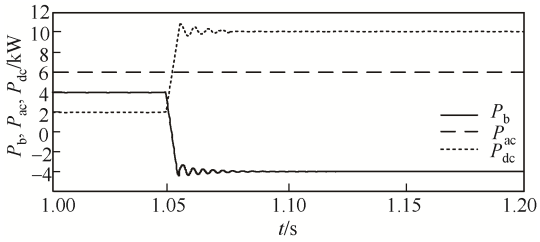


图 5 有功功率仿真波形

Fig. 5 Simulation waveforms of active power

为进行 SOC 均衡验证，MMC-BESS 保持初始时的工况，电池为充电状态。图 6 为标准差 s_γ 和自适应均衡系数 f_γ 的变化情况，SOC 均衡初期时注入到子模块内的不平衡功率小，随着 SOC 差异减小，自适应系数增大，不平衡功率随之增大。图 7 为 SOC 均衡时的三相环流波形，对比三相环流波形可

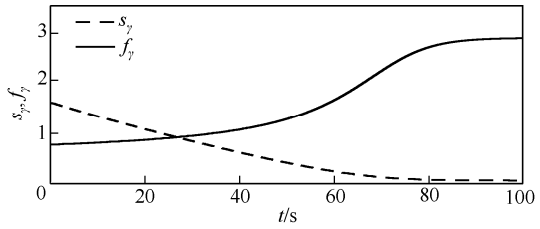
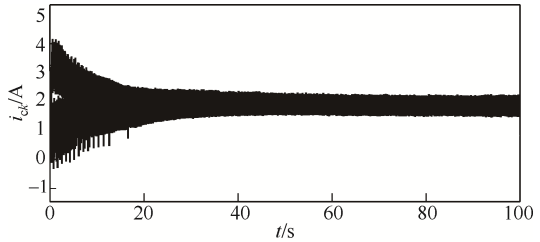
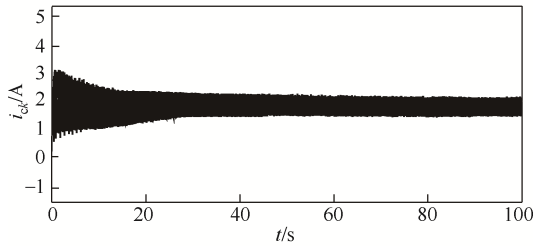


图 6 标准差 s_γ 和自适应均衡系数 f_γ 的变化情况

Fig. 6 Changes in standard deviation s_γ and adaptive balance coefficient f_γ



(a) 恒定均衡系数



(b) 自适应均衡系数

图 7 三相环流波形

Fig. 7 Waveforms of three-phase circulating current

知，与恒定均衡系数相比，采用自适应均衡系数能够有效降低 SOC 均衡初期的三相环流，验证结果与所提的理论保持一致。

图 8~图 10 分别为 a 相上下桥臂间 SOC 均衡波形、三相相间 SOC 均衡波形及 a 相上桥臂内子模块间 SOC 均衡波形。对比图 8、图 9 及图 10 可以发现，相间比上下桥臂间 SOC 均衡速度更快，满足了级联式均衡要求，而桥臂内的子模块间 SOC 均衡速度最慢，因为仅能通过改变每个子模块的端口电压调节，调节能力不如通过环流注入的相间和桥臂间 SOC 均衡。当采用自适应均衡系数方法时，相间、桥臂间及子模块间 SOC 均衡时间分别为 t_{ph}=40 s、t_{arm}=48 s、t_{SM} =60 s；当采用恒定均衡系数方法时，相间、桥臂间及子模块间的 SOC 均衡时间分别为 t'_{ph} =24 s、t'_{arm} =40 s、t'_{SM} =95 s。对比采用 2 种方法 SOC 均衡完成的时间可以看出，采用

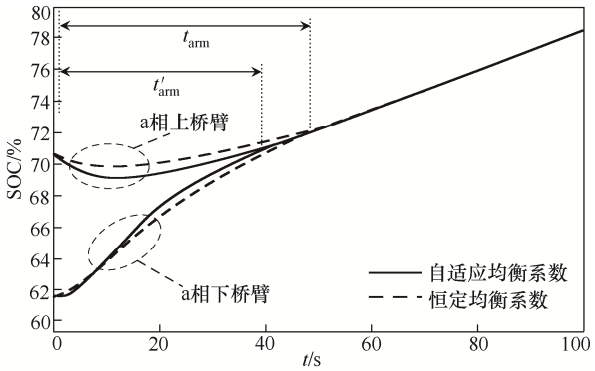


图 8　桥臂间 SOC 均衡仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms of SOC balance between bridge arms

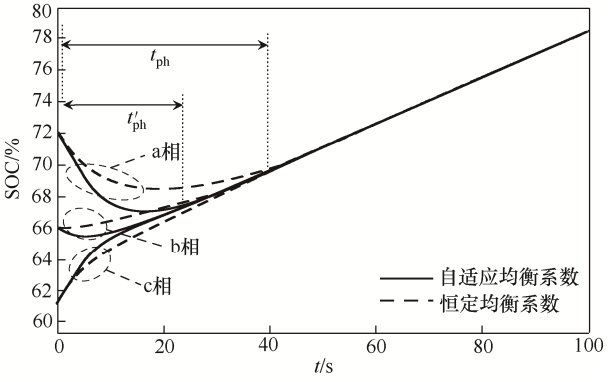
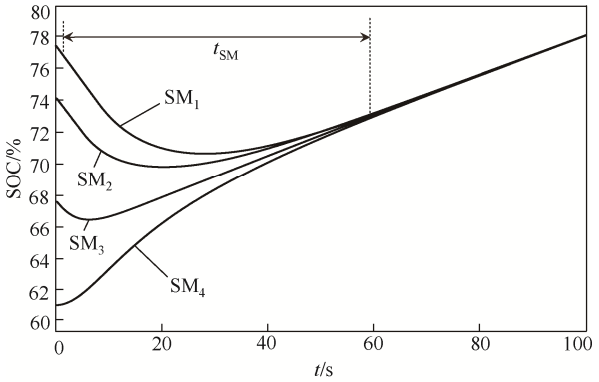
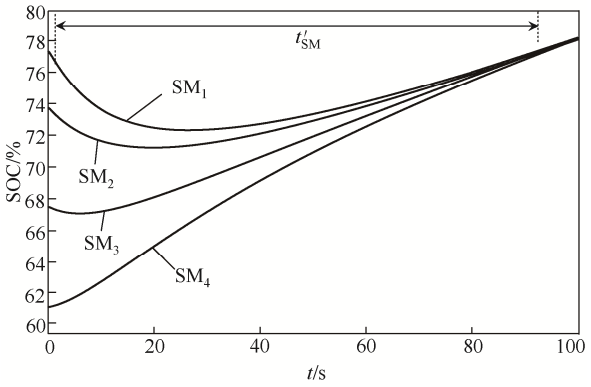


图 9　相间 SOC 均衡仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms of SOC balance between phases



(a)自适应均衡系数



(b)恒定均衡系数

图 10　子模块间 SOC 均衡仿真波形

Fig. 10 Simulation waveforms of SOC balance between submodules

自适应均衡系数后，相间和桥臂间 SOC 均衡速度会降低，而子模块间 SOC 均衡速度大幅度提升。这是因为在均衡初期，环流的最大值有所降低，进而使得相间和桥臂间 SOC 均衡速度降低，但随着电池组 SOC 差异减小，自适应均衡系数持续增大，最终电池组所有子模块间的 SOC 完成均衡所需总的时间更短。

5　结论

本文提出了 1 种自适应 SOC 均衡控制优化策略，解决了储能换流器中电池 SOC 均衡速度慢和均衡环流大的问题。以单端 MMC-BESS 为例，对所提策略进行了详细阐述，利用仿真进行了验证，得出以下结论。

(1)本文设计的基于 DC-DC 侧的功率电流双闭环控制策略具有良好的功率解耦效果，当系统接收

大功率反转指令时，具有良好的响应速度和精度。

(2)仿真结果表明，本文所提 SOC 均衡控制策略能够根据电池组 SOC 的标准差实时自适应确定均衡系数，使得均衡系数从恒定值变为可变值。与传统的恒定均衡系数相比，该策略能够缩短近一半的 SOC 均衡时间，初始时刻的均衡环流最大降低约 30%。

(3)本文所提策略具备快速功率响应及高效的 SOC 均衡能力，可应用于系统潮流调控、调峰、调频等场景，增强了电池储能系统在电力系统中实现快速功率支撑的效果。

参考文献：

[1] 郭向伟, 王晨, 钱伟, 等. 电池储能系统均衡方法研究综述[J]. 电工技术学报, 2024, 39(13): 4204-4225.
Guo Qianwei, Wang Chen, Qian Wei, et al. A review of equalization methods for battery energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(13): 4204-4225. (in Chinese)

[2] 许康桦, 崔承刚, 张传林, 等. 直流微电网混合电池储能系统的动态荷电状态均衡控制策略[J/OL]. 电源学报, 1-14. (2025-06-06)[2026-01-16]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20250606.1004.006.
Xu Kanghua, Cui Chenggang, Zhang Chuanlin, et al. Dynamic state-of-charge balancing control strategy for hybrid battery energy storage system in DC microgrid [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-14. (2025-06-06) [2026-01-16]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20250606.1004.006. (in Chinese)

[3] Li Xiangjun, Yao Liangzhong, Hui Dong. Optimal control and management of a large-scale battery energy storage system to mitigate fluctuation and intermittence of renewable generations [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(4): 593-603.

[4] Trintis I, Munk-Nielsen S, Teodorescu R. A new modular multilevel converter with integrated energy storage [C]// IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Melbourne, VIC, Australia, 2012: 1075-1080.

[5] 余欣洋, 王琛, 王毅, 等. 储能型模块化多电平换流器的桥臂级平均值模型及运行特性分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2025, 52(4): 33-43.
Yu Xinyang, Wang Chen, Wang Yi, et al. Arm average model and operational characteristics analysis of modular multilevel converter with integrated battery energy storage system [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2025, 52(4): 33-43. (in Chinese)

[6] 岳改丽, 张哲, 杜光辉, 等. 储能电池双向 DC-DC 变换器控制策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(20): 6618-6629.
Yue Kaili, Zhang Zhe, Du Guanghui, et al. Control strategy of bidirectional DC-DC converter for energy storage battery [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(20): 6618-6629. (in Chinese)

[7] Wang Zhe, Lin Hua, Ma Yajun. A control strategy of modular multilevel converter with integrated battery energy storage system based on battery side capacitor voltage control [J]. Energies, 2019, 12(11): 2151.

[8] Yang Xiaofeng, Xue Yao, Chen Bowei, et al. Enhanced modular multilevel converter based battery energy storage system [C]// 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Cincinnati, OH, USA, 2017: 4914-4919.

[9] Vasiladiotis M, Rufer A. Analysis and control of modular multilevel converters with integrated battery energy storage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 163-175.

[10] 李楠, 张磊, 马士聪, 等. 基于模块化多电平换流器的电池储能系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 144-150.
Li Nan, Zhang Lei, Ma Shicong, et al. Control strategy for battery energy storage system based on modular multilevel converters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 144-150. (in Chinese)

[11] 陶海波, 杨晓峰, 李泽杰, 等. 电能路由器中基于 MMC 的超级电容储能系统及其改进 SOC 均衡控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3970-3978.
Tao Haibo, Yang Xiaofeng, Li Zejie, et al. A modified SOC equalization control strategy of MMC based super capacitor energy storage system in electrical energy

router application [J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3970-3978. (in Chinese)

[12] 郭龙, 梁晖, 张维戈. 基于模块化多电平变流器的电池储能系统荷电状态均衡控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2688-2694.
Guo Long, Liang Hui, Zhang Weige. State-of-charge balancing control strategy for battery energy storage system based on modular multi-level converter [J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2688-2694. (in Chinese)

[13] 徐杰彦, 杨涵棣, 程志江, 等. 模块化多电平储能复合变换器 SOC 均衡策略研究[J]. 电源技术, 2021, 45(8): 1077-1081.
Xu Jieyan, Yang Handi, Cheng Zhijiang, et al. Research on SOC equalization strategy of modular multilevel energy storage hybrid converter [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(8): 1077-1081. (in Chinese)

[14] Liang Hui, Guo Long, Song Junhong, et al. State-of-charge balancing control of a modular multilevel converter with an integrated battery energy storage [J]. Energies, 2018, 11(4): 873.

[15] 杨春来, 袁晓磊, 郝伟杰, 等. 三相链式储能变换器相间 SOC 均衡最大环流功率控制[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 75-85.
Yang Chunlai, Yuan Xiaolei, Hao Weijie, Maximum circulating current power control for phase-to-phase SOC balance applied to three-phase chain-link energy storage converter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 75-85. (in Chinese)

[16] 王哲. 集成储能型模块化多电平变换器运行特性与优化控制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
Wang Zhe. Operational characteristics and optimization control of modular multilevel converter with integrated battery energy storage system [D]. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology, 2020. (in Chinese).



曹赛

作者简介：

曹赛(1999—)，男，通信作者，硕士研究生。研究方向：柔性直流输电技术。E-mail：caosai_ncepu@163.com。

王毅(1977—)，男，博士，教授。研究方向：柔性直流输电技术，电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail：yi.wang@ncepu.edu.cn。

余欣洋(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：柔性直流输电技术。E-mail：hd_yxy2000@163.com。

于义轩(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：柔性直流输电技术。E-mail：1147196108@qq.com。

余祖泳(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：柔性直流输电技术。E-mail：371256284@qq.com。

(责任编辑：耿越)