

级联 H 桥电池储能系统 SoC 均衡与暂态电压冲击抑制控制策略

王顺亮, 段宇轩, 焦宁, 马俊鹏, 张芮, 刘天琪

(四川大学电气工程学院, 成都 610065)

摘要: 荷电状态(state of charge, SoC)均衡是级联 H 桥电池储能系统中实现多模块能量动态均衡的关键, 但传统 SoC 均衡技术会加剧直流侧暂态电压冲击, 为此提出了一种复合 SoC 均衡与冲击电压抑制的控制策略。首先建立了电池储能 SoC 与输出功率的数学模型, 构建了功率均衡系数将 SoC 均衡目标融入充放电控制中, 提出了自适应调节功率均衡系数控制方法在满足系统额定功率输出的同时实现了 SoC 均衡。进而针对网侧功率突变引发的直流侧电压波动过大的问题, 建立了 DC/DC 变换器闭环传递函数模型, 揭示了关键参数对暂态响应的作用机理, 通过基于电容电压前馈的方法实现了电压冲击抑制。最后, 仿真和硬件在环实验验证了所提控制策略的优越性能。

关键词: 电池储能系统; 级联 H 桥; 荷电状态均衡; 电压冲击抑制

SoC Balancing and Transient Voltage Surge Suppression Control Strategy for Cascaded H-Bridge Battery Energy Storage Systems

WANG Shunliang, DUAN Yuxuan, JIAO Ning, MA Junpeng, ZHANG Rui, LIU Tianqi

(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: State of charge(SoC) balancing is the key to achieve dynamic energy balancing among multiple modules in cascaded H-bridge battery energy storage systems(BESS), but traditional SoC balancing techniques could exacerbate DC-side transient voltage surges. This paper proposes a compound control strategy integrating SoC balancing and voltage surge suppression. Firstly, a mathematical model of battery energy SoC and output power is established, and a power balancing coefficient is constructed to integrate SoC balancing objective into charge and discharge control. An adaptive power balancing coefficient control method is proposed, which achieves SoC balancing while satisfying the rated power output of the system. Furthermore, addressing the issue of excessive DC-side voltage fluctuations caused by sudden changes in grid-side power, a closed-loop transfer function model of the DC/DC converter is established, revealing the mechanism by which key parameters affect transient respons. And voltage surge suppression is achieved through a method based on capacitor voltage feedforward. Finally, simulations and hardware-in-loop experiments verify the superior performance of the proposed control strategy.

Key words: battery energy storage system; cascaded H-bridge; state of charge balancing; voltage surge suppression

0 引言

在“双碳”战略目标驱动下, 我国能源体系正经历深度重构, 以风电、光伏为主导的新能源已发展成为新型电力系统的支柱性电源^[1]。然而, 随着新能源渗透率持续上升, 其出力随机性引发的电网失

稳、电压波动等系统性问题日益明显^[2-5]。为强化电网对高比例新能源的承载能力^[6-7], 2024 年国家规定了新建风光电站需安装不低于额定发电容量 10%~20% 的储能系统^[8]。在此背景下, 储能系统功率变换器(power conversion system, PCS)控制策略将直接影响系统的稳定, 已成为提升新能源消纳能力的技术制高点。

在电网储能系统中, 储能单元与功率变换器共同构成其核心结构。目前, 超级电容器与电池为

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(62403339)。

Foundation item: Supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (62403339).

两种主流储能介质^[9-11]：前者功率密度高、响应快、循环寿命长，但受限于单体电压低、电压波动明显及设备成本较高等因素，难以适用于大容量储能场景；而电池储能系统(battery energy storage system, BESS)因具备高能量密度、模块化扩展能力强等优势，可满足持续数小时的能量调度需求，已成为电网级储能的主流方案。在功率变换器方面，级联 H 桥(cascaded H-bridge, CHB)功率变换器凭借模块化拓扑、优质多电平输出以及便于直接接入中高压电网等特点，在中高压储能应用中备受关注^[12-13]。然而其单相级联结构与独立直流母线设计易受模块损耗不均、调制差异等因素引发子模块能量失衡^[14]，进而导致储能单元荷电状态(state of charge, SoC)不一致，造成系统有效容量下降，严重制约该拓扑在兆瓦级储能系统中的规模化推广。因此，如何实现多模块间的能量动态均衡已成为提升 CHB-BESS 能量利用率与运行稳定性的关键问题。

现有研究中，将级联 H 桥型电池储能系统均衡控制分为相间 SoC 均衡和相内 SoC 均衡。文献[15-16]通过在系统相电压中叠加零序电压分量，重新分配三相之间的功率，达到相间平衡的目的。该策略调节能力有限，均衡速度较慢，不适用于不平衡较大的情况。另外一种为负序电流注入法，通过在三相参考电流中叠加负序电流，从而调节三相功率^[17-18]；该策略在均衡效果上优于前者，但注入的负序电流会造成 PCS 输出功率改变以及电能质量降低。文献[19]结合两种方法并做出了改进，根据切换条件选择不同均衡模式，此方法需要精确估计电池 SoC，对 SoC 估计算法要求更高。针对相内均衡控制策略，结合储能电池 SoC 构造出各子模块的三角载波，采用多载波移相的调制策略实现相内均衡^[20]，但该控制策略对于 SoC-V 曲线拟合斜率小的储能电池均衡效果较差。除此之外，也可通过改变各子模块调制电压幅值调节子模块输出的有功功率，实现模块间能量均衡^[20-21]，但这一方法存在模块电容电压在暂态过程中出现明显电压波动的缺陷。文献[22]在此基础上进一步优化，同时改变调制电压幅值和相位，重新分配相内的功率，但相位的改变使得系统无功功率增加，进而导致电压和功率损耗变大，降低了系统能量转换效率。

上述研究虽采用不同方法实现功能均衡，但均

采用固定均衡系数的方法，这一方法存在无法兼顾均衡范围与均衡速度的局限性，系数过大会降低均衡范围，过小则会降低均衡速度。同时大部分研究忽略了储能系统功率指令频繁变化导致的直流侧电压冲击的现象，不利于系统长期运行。

为解决上述问题，本文针对级联 H 桥型电池储能系统，提出了一种自适应功率均衡系数的 SoC 均衡控制策略。并针对功率切换暂态过程中，电容电压冲击过大的现象，提出了一种有效抑制电压冲击的控制策略。最后通过离线仿真和硬件在环实验验证了所提控制策略的有效性。

1 CHB-BESS 系统

1.1 CHB-BESS 拓扑结构

CHB 功率变换器子模块采用 H 桥拓扑，其在能量传输中会产生二倍频脉动功率。该功率若流入储能电池，将加速电池老化并影响 SoC 监测精度^[23]。为此，在电池与 H 桥间加入 DC/DC 环节构成两级式拓扑，可阻止脉动功率进入电池^[24]，因此本文以单相两级式 CHB 拓扑作为系统主电路，其结构如图 1 所示。单相 CHB 功率变换器由 n 个全桥(full bridge, FB)子模块组成，子模块串联经滤波电抗 L_s 接入交流电网。子模块中电池通过双向 DC/DC 变换器接入 H 桥功率单元，H 桥功率单元直流侧电压由电容 C_i 提供。

1.2 系统基础控制策略

如图 1 所示，CHB-BESS 整体控制分为两部分：第一部分为 CHB 功率变换器控制，由并网控制与功率、电压均衡控制组成；另一部分为储能单元控制，即以 DC/DC 变换器控制为基础的功率控制，以及储能电池 SoC 均衡控制。

1.2.1 CHB 功率变换器控制策略

并网控制采用典型双闭环控制结构，电流内环使用准比例谐振(proportional resonant, PR)控制器，实现谐振频率处无静差控制^[25]；外环为整体直流电压控制和无功功率控制，采用传统 PI 控制器。并网控制框图如图 1 所示，其中 i_g 、 u_g 分别为并网电流和电网电压， $U_{c,ave}$ 为子模块电容电压平均值， Q_{ac} 为输出无功功率。

电压均衡控制策略采用经典电压闭环控制，配合并网控制实现电容电压均衡。图 1 中 u_{ci} ($i=1, 2, \dots, N$, N 为子模块数量)为第 i 个子模块电容

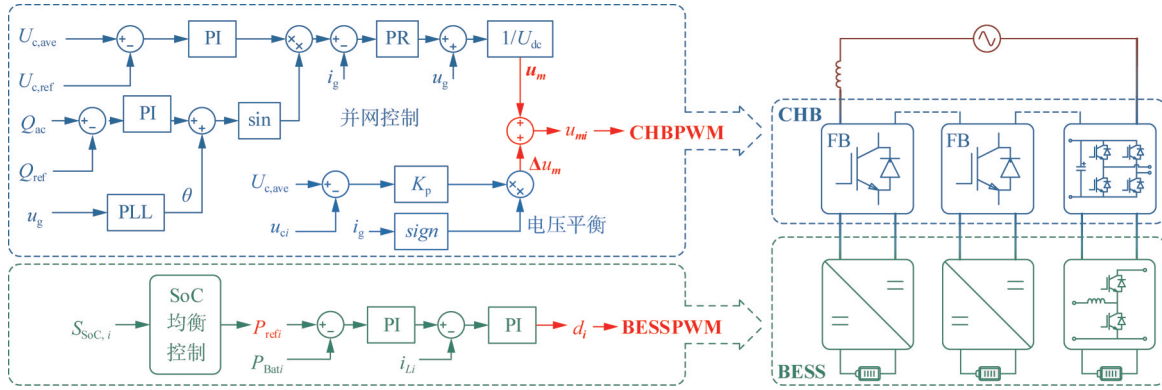


图1 CHB-BESS拓扑结构以及基础控制策略

Fig. 1 CHB-BESS topology and basic control strategy

电压, $sign$ 为符号函数, 函数输入大于0时输出+1, 输入小于0时输出-1。

1.2.2 储能单元控制策略

储能电池经DC/DC变换器接入至H桥功率单元, 变换器采用功率外环-电流内环的双闭环控制结构, 根据电网调度指令发出所需功率, 实现子模块储能单元额定功率输出, 其控制框图如图1所示。 P_{refi} 为SoC均衡控制环输出功率外环参考值, P_{Bati} 、 i_{Li} 分别为第*i*个模块DC/DC变换器输出功率和电感电流, d_i 为第*i*个模块占空比信号。

2 储能单元 SoC 均衡控制

2.1 SoC 均衡控制原理

电池实时 $S_{SoC}(t)$ 与其额定容量 C_n 、初始 $S_{SoC}(t_0)$ 以及输出功率 $P_{Bat}(t)$ 相关, 其数学关系如式(1)所示。基于此, 本文提出根据电池 SoC 控制充放电功率的均衡控制策略。即在 CHB-BESS 正常工作中, 通过子模块电池 SoC 计算均衡系数, 调整模块输出功率大小, 进而实现电池 SoC 均衡控制。考虑到级联 H 桥三相对称的特点, 本文以单相系统为例阐述本方法的实现过程。

$$S_{SoC}(t) = S_{SoC}(t_0) + \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t P_{Bat}(t) dt \quad (1)$$

式中 t_0 为起始时间。

2.2 基于自适应功率均衡系数的控制策略

2.2.1 功率调整策略

由图1可知, 传统双闭环控制策略输出占空比信号 d , 控制输出功率大小。若系统处于均衡状态或暂不投入均衡控制, 此时各子模块输出功率相同, 平均承担系统总功率, 可得各模块额定功率参

考值 P_{refi} 为:

$$P_{refi} = \frac{1}{N} P_{ref} \quad (2)$$

式中: P_{ref} 为 CHB-BESS 系统总有功功率输出参考值; N 为子模块。引入功率均衡系数 k_i ($i=1, 2, \dots, N$) 调整子模块充放电功率如式(3)所示。

$$k_i = \frac{1}{N} + \Delta k_i \quad (3)$$

式中 Δk_i 为功率校正系数。

均衡控制作用时, 子模块功率参考值 P_{refi} 为:

$$P_{refi} = k_i P_{ref} \quad (4)$$

同时为保证 SoC 均衡控制投入前后系统总有功功率保持不变, 需满足:

$$\sum_{i=1}^N \Delta k_i = 0 \quad (5)$$

通过功率均衡系数 k_i 调整子模块电池输出功率, 即可实现储能电池 SoC 均衡控制。经分析可知, 均衡系数对功率的调整存在以下两种情况。

1) 均衡系数 $0 < k_i < 1$, 即所有子模块充放电状态一致。此时若处于放电状态, SoC 更高的子模块均衡系数 k_i 更大, 以此保证输出功率更高;

2) 均衡系数 $-1 < k_i < 1$, $k_i \neq 0$, 则会出现部分子模块处于放电状态, 其余处于充电状态, 两种状态的电池充放电功率也不相同。

两种方式均可实现电池 SoC 均衡, 第二种虽均衡更快, 但会导致电池状态不一致、电路功率交互更复杂, 若参数设计不当会严重影响系统稳定性与输出电能质量。因此, 综合考虑速度与稳定性, 本文对第一种方式展开研究, 并提出自适应均衡系数控制策略。

2.2.2 自适应功率均衡系数计算方法

为了提高均衡范围以及均衡速度, 提出根据电池 SoC 动态调节均衡系数的方法: 在 CHB-BESS 充放电过程中, 得到子模块储能电池的实时 SoC 参数 $S_{\text{SoC},i}$ ($i=1, 2, \dots, N$, N 为子模块数量), 对其排序并计算平均值, 根据 $S_{\text{SoC},i}$ 与平均值 $S_{\text{SoC,ave}}$ 的差值 $\Delta S_{\text{SoC},i}$ 计算功率均衡系数 k_i , 使得放电状态下 SoC 更高的子模块输出功率更高, 充电状态则相反。实现储能电池不同速度充放电, SoC 趋于一致。 k_i 通过式(6)~(8)计算。

$$S_{\text{SoC,ave}} = \frac{\sum_{i=1}^N S_{\text{SoC},i}}{N} \quad (6)$$

$$\Delta S_{\text{SoC},i} = S_{\text{SoC},i} - S_{\text{SoC,ave}} \quad (7)$$

$$k_i = K_{\text{SoC}} \Delta S_{\text{SoC},i} \times \text{sign}(P_{\text{ref}}) + \frac{1}{N} \quad (8)$$

式中: K_{SoC} 为增益系数; N 为子模块数量。

由式(8)可知, k_i 受差值与 $\Delta S_{\text{SoC},i}$ 增益系数 K_{SoC} 影响, 若增益系数 K_{SoC} 始终保持不变, k_i 随着 $\Delta S_{\text{SoC},i}$ 降低而减小, 导致均衡速度变慢。为保证系统在 SoC 接近的情况下仍保持较快的均衡速度, K_{SoC} 需要根据系统均衡状态做相应调整。

$$\Delta S_{\text{SoC,max}} = S_{\text{SoC,max}} - S_{\text{SoC,min}} \quad (9)$$

式中 $\Delta S_{\text{SoC,max}}$ 、 $S_{\text{SoC,max}}$ 、 $S_{\text{SoC,min}}$ 分别为电池 SoC 最大差值、SoC 最大值以及最小值。

系统均衡状态根据差值 $\Delta S_{\text{SoC,max}}$ 大小分为两类: 设置 SoC 差值阈值为 ΔS_{SoC} , 当 $\Delta S_{\text{SoC,max}} > \Delta S_{\text{SoC}}$ 系统处于严重不均衡状态, 此时 $K_{\text{SoC}} = K_{\text{min}}$ (K_{min} 为常数), 取值与均衡速度密切相关, 值越大均衡速度越快, 进入快速均衡状态耗时越短, 但取值过大会影响系统动态稳定性。

当 $\Delta S_{\text{SoC,max}} < \Delta S_{\text{SoC}}$ 系统处于快速均衡状态时, 为保证系统快速均衡且保持稳定, K_{SoC} 需要随着 $\Delta S_{\text{SoC,max}}$ 的降低而增大, 因此引入具有上下限的幂函数计算该阶段 K_{SoC} , K_{SoC} 与 $\Delta S_{\text{SoC,max}}$ 的关系如图 2 所示。

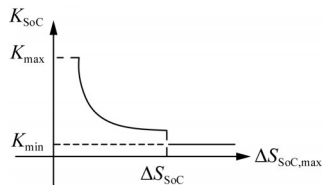


图2 K_{SoC} 关于 $\Delta S_{\text{SoC,max}}$ 函数图像

Fig. 2 Function graph of K_{SoC} regarding $\Delta S_{\text{SoC,max}}$

最终可得 K_{SoC} 关于 $\Delta S_{\text{SoC,max}}$ 的表达式如式(10)所示。

$$K_{\text{SoC}} = \begin{cases} K_{\text{min}}, \Delta S_{\text{SoC,max}} > \Delta S_{\text{SoC}} \\ \frac{a_1}{a_2 \Delta S_{\text{SoC,max}}^{a_3}} + 2K_{\text{min}}, K_{\text{SoC}} < K_{\text{max}} \\ K_{\text{max}}, K_{\text{SoC}} \geq K_{\text{max}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: K_{min} 、 K_{max} 分别为增益系数下限值、上限值; a_1 、 a_2 、 a_3 为可调系数。

式中各项系数取值需满足以下要求。

均衡过程中, 考虑各子模块输出功率需控制在额定功率的 0.8~1.2 倍, 避免功率差异过大造成系统稳定性降低。

$$0.8 \times \frac{1}{N} \leq k_i \leq 1.2 \times \frac{1}{N} \quad (11)$$

系统处于严重不均衡状态时 $K_{\text{SoC}} = K_{\text{min}}$, 可得:

$$|K_{\text{min}}(S_{\text{SoC},i} - S_{\text{SoC,ave}})| \leq 0.2 \times \frac{1}{N} \quad (12)$$

极端情况下仍满足式(12), 则存在以下关系:

$$|S_{\text{SoC,max}} - S_{\text{SoC,ave}}| \approx |S_{\text{SoC,min}} - S_{\text{SoC,ave}}| \approx 0.5 \Delta S_{\text{SoC,max}} > 0.5 \Delta S_{\text{SoC}} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)可得以下关系:

$$0.5K_{\text{min}} \Delta S_{\text{SoC}} < \frac{0.2}{N} \quad (14)$$

取系统子模块数 $N=10$, 阈值 $\Delta S_{\text{SoC}}=0.5$, 留有一定裕量, 可令 $K_{\text{SoC}}=0.05$ 。

当 $\Delta S_{\text{SoC,max}} < 0.1$ 之后, 认为各储能电池 SoC 近似均衡, 为防止 K_{SoC} 取值无穷大, 设置函数上限 $K_{\text{SoC}} = K_{\text{max}}$, 则有:

$$0.5K_{\text{max}} \Delta S_{\text{SoC,max}} \leq \frac{0.2}{N} \quad (15)$$

为满足 $\Delta S_{\text{SoC,max}} < 0.1$ 后 K_{SoC} 能迅速上升至 K_{max} , 系数 a_1 、 a_2 、 a_3 的选取需保证函数一阶导为 -1 的点在 0.1 附近, 才能保证系统整个均衡过程保持较快的均衡速度。

2.2.3 储能单元 SoC 均衡控制算法

图 3 所示为 F_{cn} 模块计算功率均衡系数控制算法中增益系数 K_{SoC} 的流程: 判断系统功率方向, 对电池 SoC 进行排序, 进而计算最大插值并与阈值比较, 最后根据比较结果计算增益系数。

图 4 给出 CHB-BESS 功率均衡系数实现储能电池 SoC 均衡的控制框图, 图中 F_{cn} 模块为上述通过 $S_{\text{SoC},i}$ 计算增益系数 K_{SoC} 的计算模块, 其中 P_{ref} 为 CHB-BESS 并网有功功率参考值, $P_{\text{ref}} > 0$ 表示系统向网侧输出功率, 储能电池处于放电状态。

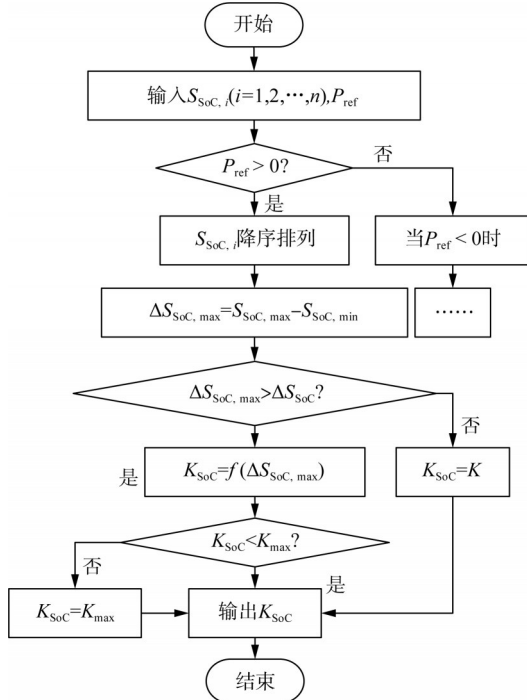
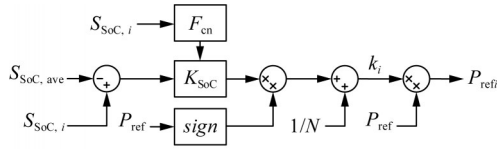
图 3 系数 K_{SoC} 计算流程Fig. 3 Calculation flow chart of coefficient K_{SoC} 

图 4 功率均衡系数控制框图

Fig. 4 Diagram of power balance coefficient control

3 暂态冲击电压抑制

3.1 直流侧电压冲击现象分析

CHB-BESS 作为电网储能设备, 承担着平抑功率波动, 削峰填谷的功能。系统与电网之间的功率交换随着电网调度指令时刻在变化, 功率的变换会引起直流侧电容电压的波动, 在加入 SoC 均衡控制策略后, 由于改变了各模块输出功率, 模块间功率的不平衡度提高, 导致这种波动更为严重, 进而出现明显的电压冲击现象。若功率指令频繁变化则会导致电容电压出现不规律的电压冲击, 对电容器的绝缘性能和寿命以及系统的稳定运行有较大影响。

通过图 1 储能系统控制框图分析可知, DC/DC 变换器负责控制系统总有功功率, DC/AC 变流器调节无功功率。当系统由放电模式切换至充电模式

时, 此时功率传输路径发生反转, 网侧功率经 DC/AC 变流器输入至 DC/DC 变换器。暂态过程中, 电容作为功率缓冲环节, 其电压变化源于两端功率传输的动态响应差异, DC/DC 变换器主动吸收功率, DC/AC 变流器被动平衡, 其功率响应滞后于 DC/DC 变换器, 电容将暂时释放能量以弥补瞬时功率缺口, 导致电压大幅降低。相反的, 当系统由充电模式转为放电模式时, 功率响应滞后差异将引发电容能量累积, 此时电压大幅上升。

为分析暂态过程中 DC/DC 功率外环控制环节对电容电压变化的影响, 忽略 CHB 功率变换器控制的影响, 并将子模块电容右侧 H 桥单元部分等效为消耗有功功率的定值电阻 R , 如图 5 所示, 在此基础上分析建立该电路闭环传递函数模型。

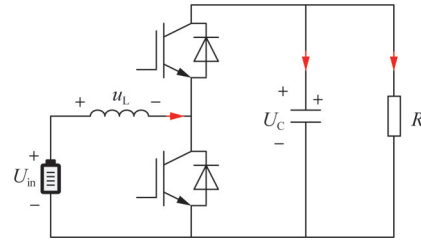


图 5 子模块简化电路

Fig. 5 Submodule simplified circuit

首先建立 DC/DC 变换器小信号模型, 得到输出电压扰动 $\hat{U}_c$ 关于占空比扰动 $\hat{d}$ 的传递函数 $G_E(s)$, 如式(17)所示。

$$\hat{U}_c = G_E(s) \cdot \hat{d} \quad (16)$$

$$G_E(s) = \frac{U_{in}}{(1-D)^2} \frac{1 - \frac{L}{R(1-D)^2}s}{1 + \frac{L}{R(1-D)^2}s + \frac{LC}{(1-D)^2}s^2} \quad (17)$$

式中 L 、 C 、 R 、 D 、 U_{in} 分别为简化电路电感值、电容值、等效电阻值、输入占空比及输入电压。

根据图 1 控制框图可得 $\hat{d}$ 与电流误差扰动 $\hat{i}_{err}$ 的关系为:

$$\hat{d} = G_i(s) \cdot \hat{i}_{err} = G_i(s)(\hat{i}_{L,ref} - \hat{i}_L) \quad (18)$$

式中: $\hat{i}_{L,ref}$ 、 $\hat{i}_L$ 分别为电感电流参考值扰动量、电感电流扰动量; $G_i(s)$ 为电流内环传递函数, 其中电 $\hat{i}_L$ 与 $\hat{d}$ 的传递函数 $G_{id}(s)$ 由 DC/DC 变换器小信号模型决定。

$$\hat{i}_L = G_{id}(s) \cdot \hat{d} \quad (19)$$

$$K_{PII}(x) = \frac{t_{PII}}{1 + c_{PII}e^{d_{PII}x}} + l_{PII} \quad (30)$$

式中系数 t_{PII} 、 l_{PII} 决定函数上下限,二者取值需保证式(24)不存在处于右半平面的极点。函数在 $x_0 = -\ln(c_{PII})/d_{PII}$ 处斜率绝对值最大为 $(t_{PII} \times d_{PII})/4$, x_0 取值略高于阈值 ΔU ,斜率绝对值尽可能大以保证电容电压快速达到稳态。

4 仿真和实验分析

4.1 CHB-BESS并网运行仿真分析

为验证本文所提出的均衡控制策略以及过电压抑制控制策略的正确性和有效性,在MATLAB/Simulink仿真平台搭建以锂电池为储能单元的仿真模型,并对仿真结果进行分析。仿真模型系统参数如表1—2所示。

表1 仿真模型系统参数

Tab. 1 Circuit parameters of simulation model

参数	数值
网侧相电压有效值/kV	5.77
额定功率/MW	1
子模块个数	10
滤波电感/mH	5
子模块电容容值/mF	5
额定电容电压/kV	1
储能电池额定容量/Ah	15
储能电池额定电压/kV	0.6
升压电感/mH	5

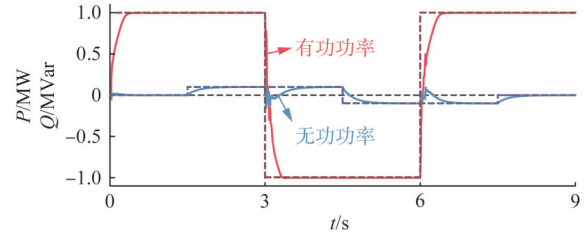
表2 储能电池初始SoC

Tab. 2 Initial SoC of battery energy storage

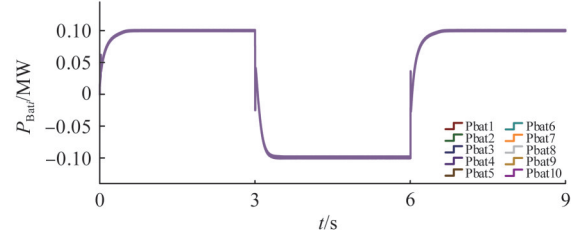
编号	容量/%	编号	容量/%
1	69.8	6	70.0
2	70.2	7	69.9
3	70.4	8	69.6
4	69.7	9	70.3
5	70.1	10	70.0

考虑实际物理系统中储能电池SoC均衡过程时间较长,为了在仿真中验证均衡控制策略的有效性,故将电池额定容量设置较小,以便能在较短之内实现SoC均衡控制。

0~3 s储能电池放电,此时 $P_{ref}=1$ MW,3 s后切换功率方向,此时系统以 $P_{ref}=-1$ MW储存能量,3 s后再次回到放电状态。输出有功功率的同时,



(a) 网侧有功、无功功率



(b) 储能电池输出功率

图7 CHB-BESS四象限运行

Fig. 7 Four-quadrant operation of CHB-BESS

无功功率于1.5 s时刻从0 Mvar切换至0.2 Mvar,3 s后输出-0.2 Mvar无功功率,最后回到0 Mvar。

图7(a)为CHB-BESS四象限运行工况示意图,仿真结果表明在本文所提的并网控制策略下,系统能够快速准确跟踪功率指令值,实现四象限运行。图7(b)为所有子模块储能电池输出功率曲线,此时储能单元控制中并未投入SoC均衡控制策略,各子模块输出功率保持一致,平均分配系统功率,此时电池SoC变化速度始终相同。

4.2 SoC均衡控制策略仿真验证分析

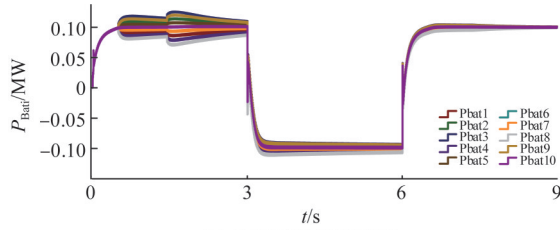
为验证本文所提出的功率均衡系数SoC均衡控制策略的有效性,对此进行仿真验证。系统参数、有功功率的变化同上,仿真结果如图8所示。

图8(a)为储能电池输出功率曲线,系统于0.5 s时投入SoC均衡控制,调整电池输出功率,输出功率的不同使得各储能电池SoC变化速度不同,如图8(b)所示。整个过程中储能电池充放电状态保持一致,SoC曲线呈收敛趋势,经过约8 s电池SoC达到均衡状态。

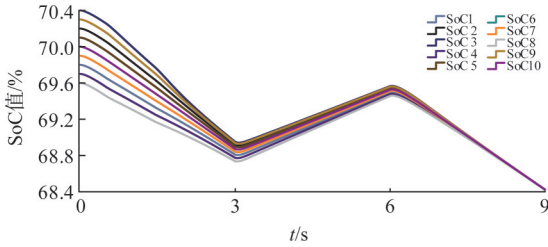
相较于图8(c)所示的传统方法,本文所提均衡控制在相同参数下具有更快的收敛速度。若试图提高传统策略的均衡速率,系统在相同 $\Delta S_{SoC,max}$ 下更容易失稳,如图9所示。因此对比传统控制策略,本文所提均衡控制策略均衡范围也更大。

4.3 直流侧冲击电压抑制仿真验证分析

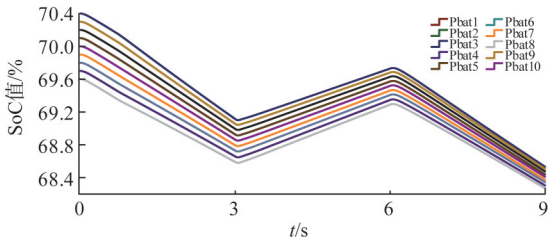
为验证本文所提冲击电压抑制控制策略的有效



(a) 储能电池输出功率



(b) 储能电池SoC曲线



(c) 传统均衡控制策略电池SoC曲线

图 8 储能电池仿真曲线

Fig. 8 Curves of energy storage battery

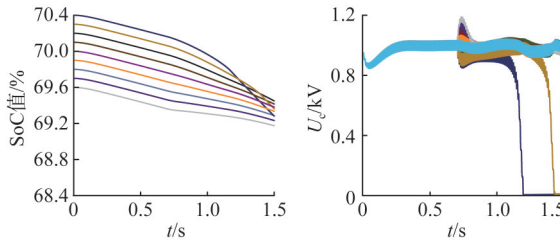
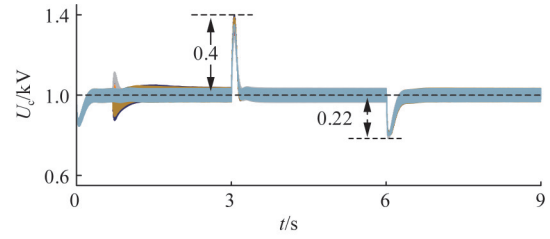


图 9 传统控制策略系统失稳曲线

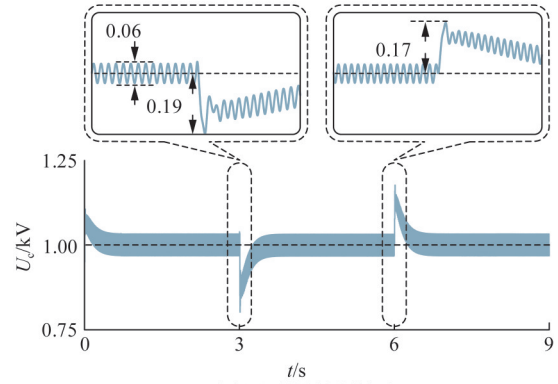
Fig. 9 Instability curves of traditional control strategy systems

性,进行仿真对比验证,对比结果如图 10 所示。

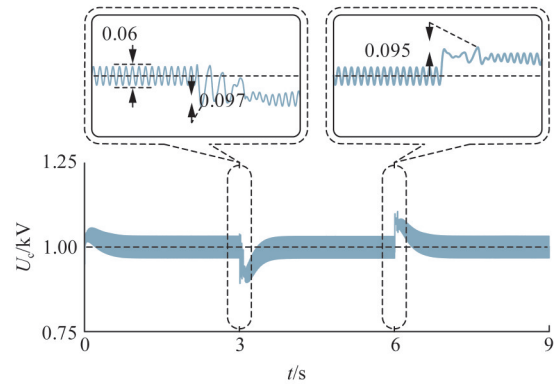
图 10(a)为传统控制策略下子模块电容电压曲线,在功率反向的暂态过程中,电容电压有明显的过冲现象。图 10(b)则是本文所提控制策略,未投入冲击电压抑制控制的子模块电容电压曲线,在两次功率切换过程中,电容电压均有较大的过冲,过冲峰值约为稳态值的 19 % 和 17 %。加入冲击电压抑制控制策略后,设置阈值 ΔU 为电压稳态值的 5 %,仿真结果如图 10(c)所示,过冲量明显降低,约为稳态值的 9.7 % 和 9.5 %,相较于传统控制策略以及未投入冲击电压抑制控制策略,过冲量最大



(a) 传统控制策略



(b) 未投入所提抑制策略



(c) 投入所提抑制策略

图 10 子模块电容电压曲线

Fig. 10 Curves of submodule capacitor voltage

下降了约 75 % 和 50 %,证明了本文所提出的冲击电压抑制控制策略的有效性。

4.4 CHB-BESS 硬件在环实验验证与分析

为进一步验证上述所提方法的有效性,搭建 4 个子模块级联的 CHB-BESS 硬件在环实验平台。实验平台采用 RTDS 实时数字仿真机模拟系统主电路,数字控制器为 DSP+FPGA 架构,主处理器采用 TMS320C28346 芯片, FPGA 用于扩展系统 IO 接口。实验平台结构如图 11 所示,部分系统参数如表 3 所示,其余参数与仿真模型参数相同。

四象限运行以及 SoC 均衡实验结果如图 12 所示,在 $t_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$ 时刻更改 RTU-BOX205

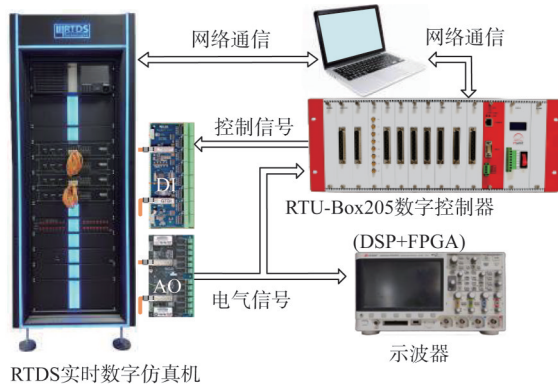


图 11 硬件在环实验平台

Fig. 11 HIL testing platform

表 3 实验系统参数

Tab. 3 Parameters of experimental system

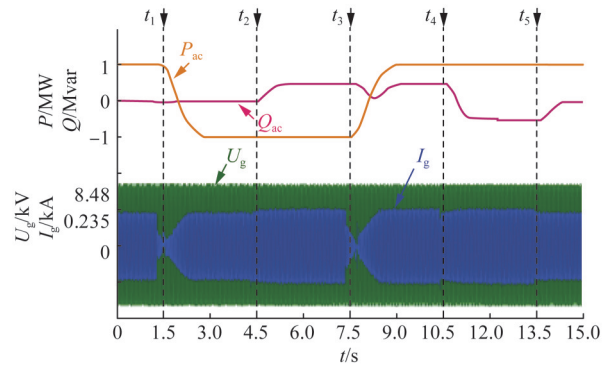
参数	数值
网侧相电压有效值/kV	6
子模块数量	4
额定电容电压/kV	2.5
储能电池额定电压/kV	1.2
储能电池额定容量/Ah	1 500

上位机有功、无功功率指令实现系统不同功率输出。在 SoC 均衡控制始终投入, 各子模块储能电池 SoC 初始值设置如图 12(b) 所示, 系统运行约半小时后, 储能电池 SoC 值如图 12(c) 所示, 差值可忽略不计, 证明储能电池已经处于均衡状态。

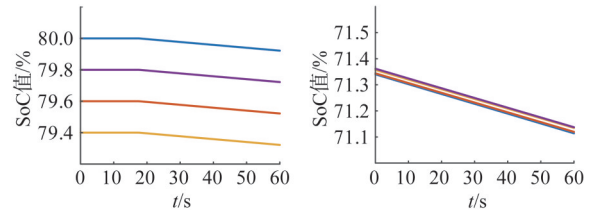
同时对比较验证了直流侧冲击电压抑制控制策略的有效性, 实验结果如图 13 所示。图 13(a) 为未加入冲击电压抑制控制前电容电压实验波形图, 在 t_1 和 t_3 时刻改变系统有功功率方向, 电容电压过冲量达到电压稳态值的 10.4 % 和 8.8 %; 加入冲击电压抑制控制后, 在相同时刻更改功率方向, 过冲量仅为稳态值的 4.8 % 和 4 %, 与之前相比降低超过一半, 与仿真验证结果一致。

5 结论

本文研究提出了一种基于级联 H 桥储能变流器的复合控制策略, 有效解决了电池储能系统中 SoC 均衡与直流侧暂态电压冲击的关键问题。基于储能单元 SoC 动态特性与充放电功率的数学模型, 提出了基于充放电速率调整的 SoC 均衡控制方法, 有效避免了传统均衡控制在系统不均衡度较大时容易出现过调制的问题, 同时适用于相内或相间均衡, 提



(a) 四象限运行实验曲线

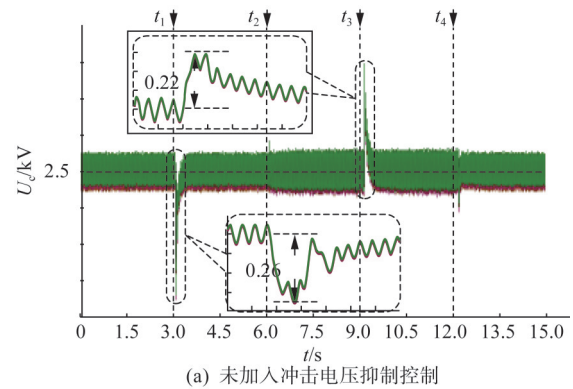


(b) 初始 SoC

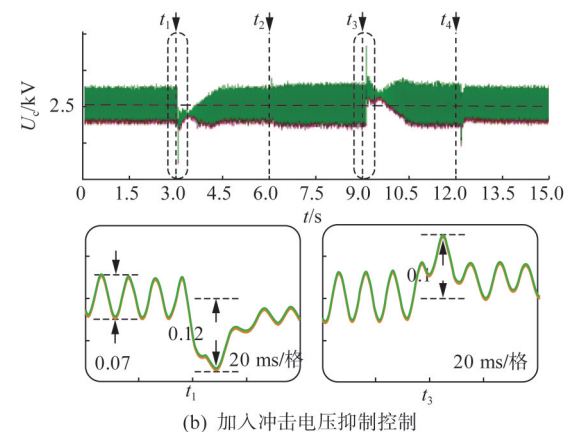
(c) 平衡状态 SoC

图 12 SoC 均衡实验曲线

Fig. 12 Experimental curves of SoC equilibrium



(a) 未加入冲击电压抑制控制



(b) 加入冲击电压抑制控制

图 13 电容电压实验曲线

Fig. 13 Experimental curves of capacitor voltage

升了控制策略的适用范围。针对功率切换引发的冲击电压问题, 揭示了功率外环参数与输出电压动态

响应的关联机制,通过引入电压前馈,实现了对暂态冲击电压的有效抑制,同比降低约 50%,显著提升了系统动态稳定性。最后通过仿真与实验验证了本文所提协同控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 国务院. 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知(国发[2021]23 号)[EB/OL]. [2021-10-26](2023-04-19). http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [2] 王鹤, 栾钧翔. 变压器的电力电子化演进及其对电压稳定影响综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 171-187. WANG He, LUAN Junxiang. Summary of power electronic evolution of transformer and its influence on voltage stability [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 171-187.
- [3] 李国庆, 刘先超, 辛业春, 等. 含高比例新能源的电力系统频率稳定研究综述[J]. 高电压技术, 2024, 50(3): 1165-1181. LI Guoqing, LIU Xianchao, XIN Yechun, et al. Research on frequency stability of power system with high penetration renewable energy: a review [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1165-1181.
- [4] 杨一鸣, 张丽玮, 刘韧, 等. 基于改进 A* 算法的含新能源电网黑启动路径优化策略[J]. 南方电网技术, 2025, 19(9): 162-173. YANG Yiming, ZHANG Liwei, LIU Ren, et al. Optimization strategy for black start path of new energy power grid based on improved A* algorithm [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(9): 162-173.
- [5] 刘洪波, 刘坤诚, 盖雪扬, 等. 高比例新能源接入的主动配电网规划综述[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 151-161. LIU Hongbo, LIU Shencheng, GAI Xueyang, et al. Overview of active distribution network planning with high proportion of new energy access [J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 151-161.
- [6] 孙伟卿, 罗静, 张婕. 高比例风电接入的电力系统储能容量配置及影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 9-18. SUN Weiqing, LUO Jing, ZHANG Jie. Energy storage capacity allocation and influence factor analysis of a power system with a high proportion of wind power [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 9-18.
- [7] 莫基晟, 尹纯亚, 黄新民, 等. 考虑有功无功协调恢复的风电场高电压穿越策略[J]. 发电技术, 2025, 46(4): 737-747. MO Jisheng, YIN Chunya, HUANG Xinmin, et al. High voltage crossing strategy of wind farm considering active and reactive coordinated recovery [J]. Power Generation Technology, 2025, 46(4): 737-747.
- [8] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电化学储能电站接入电网技术规定: GB/T 36547—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [9] 张明霞, 闫涛, 来小康, 等. 电网新功能形态下储能技术的发展愿景和技术路径[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1370-1377. ZHANG Mingxia, YAN Tao, LAI Xiaokang, et al. Technology vision and route of energy storage under new power grid function configuration [J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1370-1377.
- [10] 贺鸿杰, 张宁, 杜尔顺, 等. 电网侧大规模电化学储能运行效率及寿命衰减建模方法综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 193-207. HE Hongjie, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review on modeling method for operation efficiency and lifespan decay of large-scale electrochemical energy storage on power grid side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 193-207.
- [11] 颜湘武, 崔森, 宋子君, 等. 基于超级电容储能控制的双馈风电机组惯量与一次调频策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 111-120. YAN Xiangwu, CUI Sen, SONG Zijun, et al. Inertia and primary frequency regulation strategy of doubly-fed wind turbine based on super-capacitor energy storage control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 111-120.
- [12] 蔡旭, 李睿, 刘畅, 等. 高压直挂储能功率变换技术与世界首例应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 200-211, 387. CAI Xu, LI Rui, LIU Chang, et al. Transformerless high-voltage power conversion system for battery energy storage system and the first demonstration application in world. [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 200-211, 387.
- [13] 刘伟, 夏敏学, 梁晨鹏. 高压直挂大容量电池储能系统实时仿真及控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 154-166. LIU Wei, XIA Minxue, LIANG Chenpeng. Real-time simulation and control of a large capacity battery energy storage system directly connecting to a high-voltage grid without a transformer [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 154-166.
- [14] 朱皓天, 刘思阳, 李旭东, 等. 级联整流相内-相间直流电压均衡控制策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(12): 5151-5160. ZHU Haotian, LIU Siyang, LI Xudong, et al. Inner-phase and mutual-phase DC voltage equalization control strategy for cascaded rectifier [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 5151-5160.
- [15] JIANG C, BAO Y, CHEN X, et al. Optimizing control for system-wide state-of-charge balancing in cascaded h-bridge battery energy storage systems [C]//2023 2nd Asia Power and Electrical Technology Conference (APET), December 28-30, 2023, Shanghai, China. New York: IEEE, 2023: 874-879.
- [16] 毛苏闽, 蔡旭. 大容量链式电池储能功率调节系统控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 226-231. MAO Sumin, CAI Xu. Control strategy for power conditioning system of large capacity cascaded battery energy storage system [J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 226-231.
- [17] ZHONG W, GONG J, PAN S, et al. An Improved negative-sequence current compensation method for star-connected CHB STATCOM [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 4786-4795.
- [18] 彭啸宇. 电网不平衡工况级联 H 桥 STATCOM 的控制策略研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [19] 刘畅, 蔡旭, 陈强. 链式电池储能系统的荷电状态复合均衡控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 68-77.

(下转第 21 页 Continued on Page 21)