

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241223

基于改进下垂系数的 SOC 均衡下垂控制

程子霞¹, 丁青波¹, 柴旭峥²

(1. 郑州大学电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 国网许昌供电公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 为解决传统的下垂控制存在均分精度不足、无法合理分配电流、下垂系数的取值无限制以及电池荷电状态 (state of charge, SOC) 均衡速度慢的问题, 提出一种基于改进下垂系数的 SOC 均衡下垂控制。首先, 分析了传统幂指数形式下垂控制的缺陷, 提出幂指数嵌套反正切函数的下垂系数形式, 以此来限制下垂系数的取值进而提高控制系统的稳定性与可靠性。随后, 针对 SOC 均衡速度较慢的问题, 提出在下垂系数中引进增速因子 Q 来提升均衡速度, 并分析了不同 Q 值对下垂曲线的影响。最后, 搭建仿真模型对改进方法进行对比验证。仿真结果表明所提改进的 SOC 均衡速度在 SOC 差距较小时有较大提升。在 SOC 均衡的过程中, 下垂系数的变化更平滑, 母线电压在 SOC 差距较大时也不会发生较大振荡。

关键词: 下垂控制; 下垂系数; SOC 均衡; 荷电状态

SOC balancing droop control based on an improved droop coefficient

CHENG Zixia¹, DING Qingbo¹, CHAI Xuzheng²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
2. State Grid Xuchang Power Supply Company, Xuchang 461000, China)

Abstract: To address the issues of inadequate sharing accuracy, irrational current distribution, unbounded droop coefficient values, and slow state of charge (SOC) balancing in traditional droop control, this paper proposes a novel SOC balancing droop control method based on an improved droop coefficient. First, the shortcomings of traditional power index form droop control are analyzed, and a new droop coefficient form embedding a nested arctangent function into the power index is proposed to limit the droop coefficient values, thereby enhancing system stability and reliability. Subsequently, to tackle the problem of slow SOC balancing speed, an acceleration factor Q is introduced into the droop coefficient to improve the balancing speed, and the impact of different Q values on the droop curve is analyzed. Finally, a simulation model is constructed to validate the proposed method through comparative analysis. Simulation results demonstrate that the improved method significantly accelerates SOC balancing when the SOC difference is small. During the balancing process, the droop coefficient varies more smoothly, and the bus voltage does not exhibit significant oscillations even when the SOC difference is large.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52107130).

Key words: droop control; droop coefficient; SOC balancing; state of charge

0 引言

面对能源短缺危机和环境保护的挑战, 世界各国均致力于以太阳能、风能为代表的清洁能源的开发利用。我国《“十四五”可再生能源发展规划》中也明确指出将继续大力发展太阳能、风能等可再生能源, 逐步构建以新能源发展为主体的新型电力系统^[1-5]。

在光伏发电等环境敏感型的分布式电源中, 发电功率会受到环境因素的影响而产生较大的波动从而导致发电功率下降^[6-7]。为克服分布式电源的缺点, 美国可靠性技术解决方案协会在 2001 年首次发布了微电网的基本概念^[8-9]。相较于交流微电网, 直流微电网因其结构简单、能量转换环节减少、无需处理无功功率和谐波等优点受到广泛关注^[10-11]。当前, 直流微电网的研究重点在于如何保持直流母线电压的稳定性^[12-13]。由于分布式能源以及负荷的波

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (52107130)

动性, 直流微电网中往往需要配置储能系统来维持母线电压稳定^[14]。

电池储能系统(battery energy storage system, BESS)因其高可靠性、技术成熟和较高的能量密度, 已成为可再生能源储能配置的首选^[15-18]。在 BESS 中, 下垂控制策略是应用最为广泛的控制方法。现有基于下垂控制的 BESS 主要分为并联型和级联型两类, 其中并联型 BESS 因其即插即用的特性, 广泛应用于低压弱电网环境^[19-20]。而在实际的充放电过程中, 由于电池硬件参数和工作特性的差异, 电池的荷电状态(state of charge, SOC)不可避免地存在差异^[21-24]。为了调整 BESS 的出力深度并防止 SOC 的饱和或耗尽, 需要采用 SOC 均衡控制手段来降低 SOC 的不均衡度, 从而提高储能电池的使用寿命及改善系统的供电可靠性。然而传统的下垂控制很难兼顾到电流和电压的稳定, 并且固定的下垂系数的取值易导致蓄电池的过放和过充, 不利于系统稳定, 且难以实现功率合理分配以及 SOC 均衡。

为此, 学者们提出了许多 SOC 均衡控制方法。文献[25]提出了一种自适应分级协调控制策略, 在储能系统充电和放电过程中, 储能单元(energy storage units, ESUs)之间的功率分配根据各自的荷电状态进行调整。然而, 由于下垂系数会随着 SOC 变化的线性函数变化, 导致 SOC 的调整速度较慢且 SOC 均衡的实现速度不够迅速。文献[26]引入了一种改进的 SOC 幂函数下垂控制策略, 在该策略中, 充电过程中的下垂系数 m_p 与 SOC 的 n 次幂成正比, 而放电过程中的 m_p 则与 SOC 的 n 次幂成反比; 虽然较大的 n 值可以加快 SOC 均衡速度, 但会导致均分精度降低, 电压偏差增大。文献[27]采用了 SOC 指数函数下垂控制策略, 其中充电过程中的下垂系数 k_d 与 SOC 的指数函数 ($\exp[p(S_{oc} - A_{soc})]$) 成正比, 而放电过程中的下垂系数 k_d 与该指数函数成反比; 但较大的 p 值虽有助于加快均衡速度, 但也会降低均分精度。文献[28]在文献[26-27]的基础上提出了 SOC 幂指数下垂控制策略, 该策略同时考虑了 SOC 均衡速度和均分精度; 然而该方法未考虑如何减小均衡过程中产生的母线电压偏差, 并且平均值 A_{soc} 的确定需要借助辅助控制层, 从而增加了系统的复杂性。

为了在提高均分精度的同时确保 SOC 均衡速度, 并维持母线电压的稳定性, 同时降低控制复杂性, 本文提出了一种改进下垂系数的下垂控制方法。针对 SOC 差异较大时, 传统下垂系数取值过高的问题, 本文将幂指数与反正切函数相结合, 控制下垂系数的范围, 从而在提高均分精度的同时合理分配

蓄电池功率, 增强了母线电压的稳定性。此外, 本文在下垂系数中引入了增速因子 Q , 以提高在 SOC 差距较小时的均衡速度。最后, 通过对比实验, 将幂指数形式的下垂系数与改进后的下垂系数进行了验证, 仿真结果表明, 改进后的下垂控制方法在均分精度、母线电压稳定性以及 SOC 均衡速度方面均得到了提升。

1 传统下垂控制

1.1 下垂控制基本原理与缺陷分析

在直流微电网中, 下垂特性表达式如式(1)所示。

$$U_{dc} = U_{ref} - R_d I_{dc} \quad (1)$$

式中: U_{dc} 为蓄电池输出电压参考值; U_{ref} 为母线电压参考值; I_{dc} 为蓄电池输出电流; R_d 为虚拟阻抗。

根据式(1)画出下垂控制特性曲线如图 1 所示。

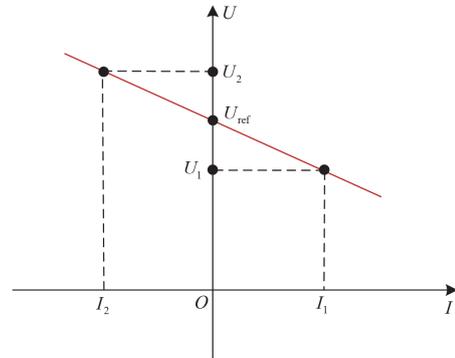


图 1 下垂控制特性曲线

Fig. 1 Droop control characteristic curve

下垂控制根据实时母线电压与额定母线电压之间的差值来确定蓄电池的工作状态。当蓄电池输出电流为正时, 表示蓄电池处于放电状态, 此时直流母线的实际电压低于额定电压, 下垂控制使蓄电池放电来提高母线电压, 以维持电压稳定; 反之, 当母线电压高于额定电压时, 下垂控制则使蓄电池处于充电状态, 确保母线电压稳定。

在储能系统中, 常常会有多个变换器同时管理着蓄电池。考虑到储能系统的可靠性, 这些变换器通常会被设计成并联的结构。搭建了两组并联蓄电池控制系统等效模型如图 2 所示。

图 2 中: U_{dref} 为蓄电池端口电压; R_L 为直流负载。对于直流微电网来说线路阻抗 R_{line} 要远远小于虚拟阻抗 R_d , 一般忽略不计。

由式(1)与图 2 可得

$$\begin{cases} u_{dc1} = U_{ref} - R_{d1} i_{dc1} \\ u_{dc2} = U_{ref} - R_{d2} i_{dc2} \end{cases} \quad (2)$$

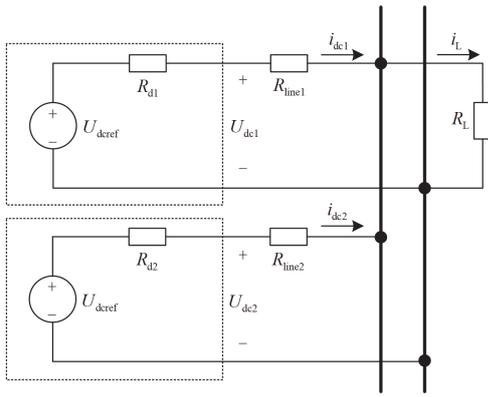


图2 两组并联蓄电池控制系统等效模型

Fig. 2 Equivalent model of two parallel battery control systems

式中: u_{dc} 为蓄电池输出电压; i_{dc} 为蓄电池为输出电流。

联立式(1)与式(2)有

$$\frac{i_{dc1}}{i_{dc2}} = \frac{R_{dc2}}{R_{dc1}} \quad (3)$$

设 i 为蓄电池的组别, 则 Δu_i 为第 i 个变换器的压降, 可表示为

$$\Delta u_i = u_{ref} - u_{dci} = R_{di} i_{dci} \quad (4)$$

式中: u_{ref} 为蓄电池额定输出电压; i_{dci} 为第 i 个变换器的输出电流; R_{di} 为第 i 个变换器的虚拟阻抗。由式(4)可以推得 R_{di} 的取值范围为

$$R_{di} \leq \frac{\Delta U_{i\max}}{i_{dci}} \quad (5)$$

式中: $\Delta U_{i\max}$ 为维持母线电压稳定的最大压降, 它与 i_{dci} 共同决定了 R_{di} 的取值。可以看出, R_{di} 的取值需要满足一定的条件, 过大的 R_{di} 的会影响系统的稳定性。

在一般的微型直流电网中, 电路阻抗一般都比较小, 所以电压的偏移几乎可以忽略, 也就是说每个蓄电池组的输出电压可以认为是相等的。即

$$u_{dc1} = u_{dc2} \quad (6)$$

联立式(1)与式(6)可得

$$P_1 R_{d1} = P_2 R_{d2} \quad (7)$$

式中: P_1 、 P_2 为两组蓄电池的输出功率。

由式(7)推出蓄电池的输出功率与下垂系数成线性反比关系, 因此系统中并联蓄电池组的功率分配取决于其下垂系数。而传统下垂控制中, 下垂系数 R_{di} 的取值是固定的, 也就是说蓄电池组之间的功率分配也是固定的。对于蓄电池组来说, 分配电流和功率不合理或是固定分配, 很容易出现蓄电池 SOC 水平过高却仍维持充电状态或是蓄电池 SOC 水平

过低却维持放电状态, 即导致蓄电池的过放和过充, 严重缩短蓄电池的使用寿命, 同时也可能使系统失去稳定性。

图3为传统下垂控制缺陷分析示意图。图中: R_i 与 R_j 分别为两条线路的电路阻抗; R_1 、 R_2 与 R_3 、 R_4 分别为两组下垂系数, 且有 $R_i \neq R_j$ 、 $R_1 = R_2 < R_3 = R_4$; ΔU 与 ΔU^* 分别为两组下垂系数的电压偏移量; ΔI 与 ΔI^* 分别为两组下垂系数的电流偏移量, 其中 $\Delta U < \Delta U^*$, $\Delta I > \Delta I^*$ 。

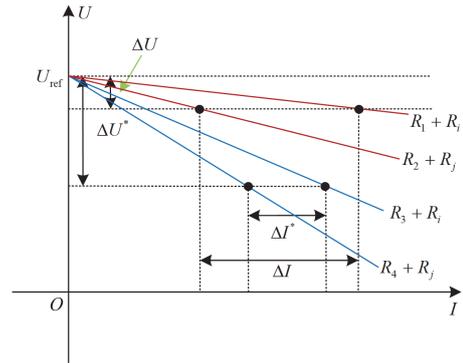


图3 传统下垂控制缺陷分析

Fig. 3 Defect analysis of traditional sag control

除此之外, 如图3中的 R_3 、 R_4 组所示, 此时电流的偏移量变得很小但电压偏移量会变得很大, 即电流分配精度高但电压浮动大; 而如 R_1 、 R_2 组所示, 当虚拟阻抗 R_{di} 的取值没那么小时, 电压浮动虽然减小但是电流的分配精度会下降。也就是说, R_{di} 的取值必须适中, 既不能偏大也不能偏小, 偏大会导致电压浮动影响系统稳定性, 偏小会导致电流偏移量过大导致电流分配精度下降。而 R_{di} 的取值又是固定的, 由于各蓄电池组电路阻抗、容量、SOC 水平不尽相同, 因此 R_{di} 的取值很难兼顾到电流和电压稳定。

总的来说, 传统的下垂控制很难兼顾到电流和电压稳定, 并且固定的下垂系数的取值易导致蓄电池的过放和过充, 不利于系统稳定。

1.2 SOC 均衡

针对传统下垂控制方法在并联储能系统中的缺陷, 可以将下垂系数与蓄电池荷电状态联系起来, 使系统能够根据蓄电池的荷电水平合理分配功率和电流。

通常, 控制并联蓄电池组的充放电过程需要满足电流均分的要求, 因此下垂参数应与系统的荷电状态相结合进行调整。具体而言, 充电时应减少对 SOC 较高蓄电池组的电流分配, 增加对 SOC 较低蓄电池组的电流分配; 放电时则应增加对 SOC 较高蓄电池

组的电流分配,减少对 SOC 较低蓄电池组的电流分配,从而加速不同蓄电池组之间 SOC 差异的缩小。

为了分析传统考虑 SOC 均衡的下垂控制方法的特点,本文先对下垂系数采用 SOC 幂指数形式的下垂控制进行分析。首先要进行 SOC 的估算,一般采用库伦估算法。

$$S_{OCi} = S_{OC0} - \frac{1}{C_{bat}} \int i_L dt \quad (8)$$

式中: S_{OC0} 为初始的蓄电池荷电状态; C_{bat} 为蓄电池的容量; i_L 为蓄电池的输出电流。

SOC 幂指数形式下垂控制的下垂系数为

$$R(S_{OCi}) = R_D \cdot k_{Di} \quad (9)$$

$$k_{Di} = \begin{cases} \exp[p(S_{OCi}^n - A^n)] & i_{dci} < 0, S_{OCi} \neq A \\ \exp[p(A^n - S_{OCi}^n)] & i_{dci} > 0, S_{OCi} \neq A \\ 1 & i_{dci} = 0, S_{OCi} = A \end{cases} \quad (10)$$

式中: R 为下垂系数; R_D 为初始下垂系数,其值为 0.5; k_{Di} 为改进下垂控制中下垂系数影响因子; A 为荷电状态的平均值; p 为收敛速度因子; n 为荷电状态的幂指数。

当 $i_{di} > 0$ 时,即蓄电池工作在放电状态,这时如果并联储能单元 SOC 值小于平均值,即 $S_{OCi} < A$,SOC 均衡的下垂控制策略使得 $R(S_{OCi}) > R_D$,控制此状态蓄电池放电的电流要小于正常采用传统下垂控制时的放电电流;与之相反,如果并联储能单元 SOC 值大于平均值,即 $S_{OCi} > A$,为了使输出的电流变大,需要减小下垂系数,则 $R(S_{OCi}) < R_D$ 。在蓄电池充电条件下,下垂系数的变化趋势正好与蓄电池放电条件下的相反。当蓄电池组间的充放电电流相等时,补偿过程结束, k_{Di} 变为 1,即由改进下垂控制变为传统的下垂控制。以此实现了充电时 SOC 高的蓄电池充电功率小,放电时蓄电池放电功率大。

取 $n=3$ 、 $p=5$ 、 $R_D=0.5$,画出式(9)所示的下垂系数变化曲线,如图 4 所示。

分析图 4 可以看出, R 的取值符合指数函数的增长趋势,当 $S_{OCi}^3 - A^3$ 超过 0.4 后 R 的增长速率非常大,在 $S_{OCi}^3 - A^3$ 到达 0.6 时 R 取到了 10,其均分精度很低;且在 R 的取值较大的时候会导致下垂控制的电压浮动变大,大大影响系统的稳定性;除此之外,当一组蓄电池的 R 取值较大时另一组蓄电池的 R 将取到几乎为 0 的值,从而导致下垂控制其电流输出的很小近似切断,系统相当于只与一组蓄电池进行能量交换,这也会降低系统的可靠性。为了提高系统稳定性,且要兼顾 SOC 均衡速度以及均分精度,本文对下垂系数进行了改进。

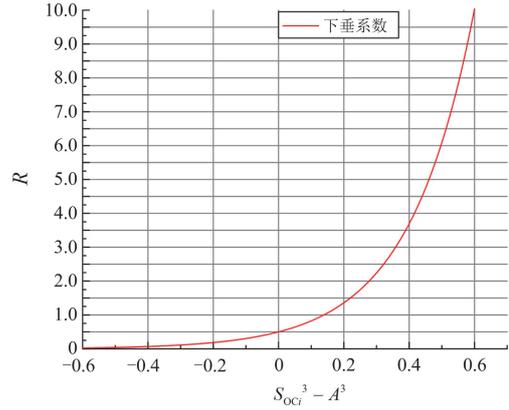


图 4 幂指数形式下垂系数变化图

Fig. 4 Power index function form sag coefficient variation diagram

2 改进下垂系数

本文提出的改进下垂系数采用反正切函数嵌套幂指函数的形式,其表达式为

$$R(S_{OCi}) = R_D \cdot k_{Di} \quad (11)$$

$$k_{Di} = \exp(a_{Di}) \quad (12)$$

$$a_{Di} = \begin{cases} \arctan[p(S_{OCi}^n - A^n)] & i_{dci} < 0, S_{OCi} \neq A \\ \arctan[p(A^n - S_{OCi}^n)] & i_{dci} > 0, S_{OCi} \neq A \\ 0 & i_{dci} = 0, S_{OCi} = A \end{cases} \quad (13)$$

式中: a_{Di} 为改进下垂控制中下垂系数影响因子。

根据反正切函数的性质, a_{Di} 的值应被反正切函数限制在某一范围内。取 $n=3$ 、 $p=5$,画出 a_{Di} 在 $S_{OCi}^3 - A^3$ 变化时的函数图像,如图 5 所示。其中, $S_{OCi}^3 - A^3$ 范围同图 4。

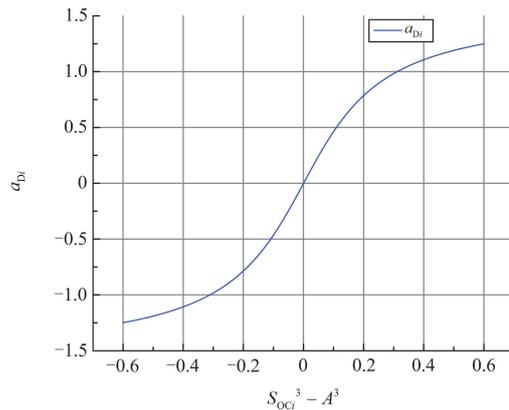


图 5 a_{Di} 变化曲线图

Fig. 5 a_{Di} change curve

由图 5 可知, a_{Di} 值的增长符合反正切函数的特征。在区间 $(-0.6, 0.6)$ 内,即使 $S_{OCi}^3 - A^3$ 取较大值, a_{Di} 的值也会被限制在 $(-0.9, 0.9)$ 的区间内。由于以 e

为底的指数函数是单调递增的, 因此 k_{Di} 也会受到 a_{Di} 的影响, 进而被反正切函数限制在某一确定范围内。而 R 的取值又与 k_{Di} 成正比, 因此 R 也会被限定在一个确定的范围内。

设定 $n=3$ 、 $p=5$, 绘制改进后的下垂系数变化曲线与幂指数函数下垂系数变化曲线的对比图, 如图 6 所示。

图 6 中: 当 $S_{OCi}^3 - A^3$ 为 0 时, 两条曲线相交并且均达到初始下垂系数 R_D ; 在 $S_{OCi}^3 - A^3$ 大于 0 的区间, 改进后的下垂系数曲线在 $S_{OCi}^3 - A^3$ 较小时与幂指数函数曲线相近, 但在 $S_{OCi}^3 - A^3$ 较大时显著低于幂指数函数曲线; 在 $S_{OCi}^3 - A^3$ 小于 0 的区间, 改进后的下垂系数整体高于幂指数函数的下垂系数。总体而言, 改进后的下垂系数变化曲线更加平滑, 且其取值不会过大。

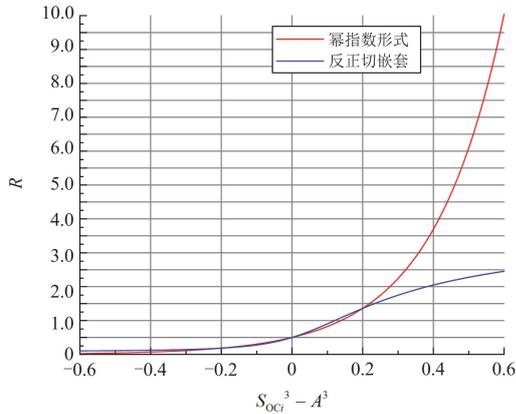


图 6 两组下垂系数变化曲线

Fig. 6 Two groups of sag coefficient change curves

改进后的下垂系数变化曲线表现出更加平滑的特性, 表明两组蓄电池的功率分配比例得到了优化, 从而实现了更合理的功率分配。同时, 嵌套反正切函数的形式有效避免了幂函数在较高输入时导致下垂系数 R 值过大的问题, 成功钳制了 R 的最大值, 消除了不同组蓄电池在 SOC 均衡过程中可能出现的 R 值差异过大的情况, 进而有效降低了系统的不稳定性。结合图 4 的分析, 钳制 R 的最大值还能够解决在 SOC 差距较大时, 下垂系数差异过大导致某些蓄电池组几乎停止工作的情况, 从而提升了系统的可靠性。

然而在反正切函数嵌套幂指数形式的下垂系数中, 当 $S_{OCi}^3 - A^3$ 较大时, 下垂系数的值较小。因此, 相对于幂指数形式, 使用该组合函数的两蓄电池组的 R 值差异较小, 这可能会导致并联蓄电池组的状态均衡速度受到影响。为了提高 SOC 均衡速

度, 在式(13)的基础上引入了均衡增速因子 Q , Q 的具体形式为

$$Q = \frac{m}{\pi} \quad (14)$$

式中: $m \geq \pi$ 。

设引入增速因子后的 a_{Di} 为 a_{Di}^* , 下垂系数表达式变为

$$R(S_{OCi}) = R_D \cdot k_{Di} \quad (15)$$

$$k_{Di} = \exp(a_{Di}) \quad (16)$$

$$a_{Di}^* = \begin{cases} Q \cdot \arctan[p(S_{OCi}^n - A^n)] & i_{di} < 0, S_{OCi} \neq A \\ Q \cdot \arctan[p(A^n - S_{OCi}^n)] & i_{di} > 0, S_{OCi} \neq A \\ 0 & S_{OCi} = A \end{cases} \quad (17)$$

图 7 为在 $n=3$ 、 $p=5$ 、 $R_D=0.5$ 条件下, m 取不同值时的下垂系数变化曲线。

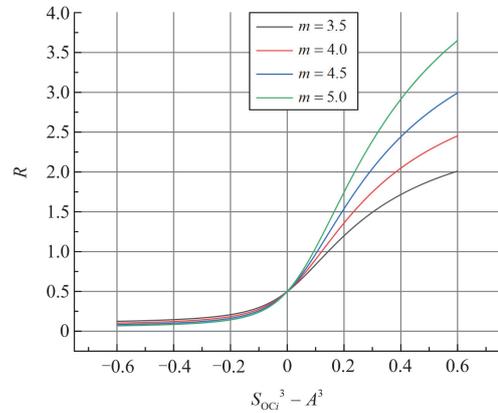


图 7 不同 m 值下的改进下垂系数变化曲线

Fig. 7 Variation curve of improved sag coefficient under different m values

从图 7 可以看出, 无论 m 取何值, 下垂系数的变化始终受到反正切函数的约束, 始终在某一特定范围内波动。随着 m 值的增大, 下垂系数 R 的增长速率及其最大值也会相应增加。可以预见, 当 m 增大到一定程度时, 尽管反正切函数依然能对 R 施加约束, 限制其不超过某一阈值, 但该阈值将变得非常高, 从而导致反正切函数的约束效果逐渐减弱, R 值仍可能在 SOC 差异较大时达到较高的数值。因此, m 的取值不应过大。根据图 7 分析, 当 m 超过 5 时, 反正切函数的钳制效果将逐渐被削弱, R 值仍可能取到较大的值。因此, 本文将 m 的最大值限定为 5。

在 SOC 差距较小时通过增加增速因子 Q 提高两组蓄电池的差值以提高均衡速度, 不能影响到 SOC 差距过大时系统的稳定性, 因此 m 的取值应当与 SOC 的差值成反比, 即 SOC 差距较小时取较大

值以提高均衡速度,在 SOC 较大时取较小值以保证系统的稳定性。

由上述分析,可得 m 的取值范围。

$$5 > m \geq \pi \quad (18)$$

又有 m 与 SOC 的差值须成反比,因电池充放电过程中 SOC 是均匀变化的,本文将 m 的值取为与 $S_{OCi}^3 - A^3$ 成线性均匀反比的形式,则 m 为

$$m = 5 - \frac{S_{OCi}^3 - A^3}{0.4} \quad (19)$$

结合式(15)一式(17),设计改进下垂系数的下垂控制策略框图如图 8 所示。

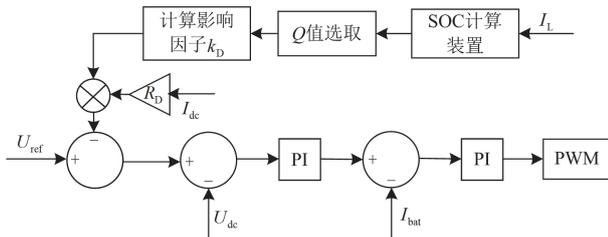


图 8 改进的下垂控制策略框图

Fig. 8 Improved droop control strategy block diagram

3 仿真验证

为了验证本文所提下垂系数改进方法的有效性,与正确性,本文在 Matlab/Simulink 环境中搭建了一套直流微电网系统,包含一组光伏电池和两组并联蓄电池。蓄电池整体控制结构如图 9 所示,其中: Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 为 MOS 管; C_1 、 C_2 与 L_1 、 L_2 为变换器电容与电感; I_{bat1} 、 I_{bat2} 为蓄电池输出电流;

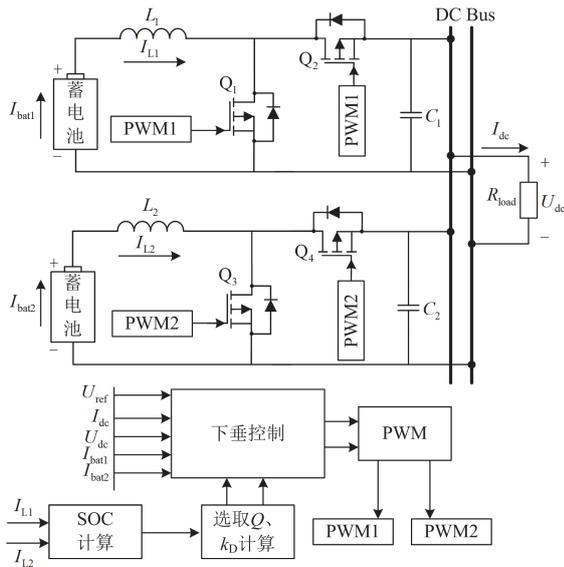


图 9 蓄电池系统整体控制结构

Fig. 9 Overall control structure of battery system

I_{dc} 、 U_{dc} 分别为负载电流与电压。光储系统仿真模型如图 10 所示。

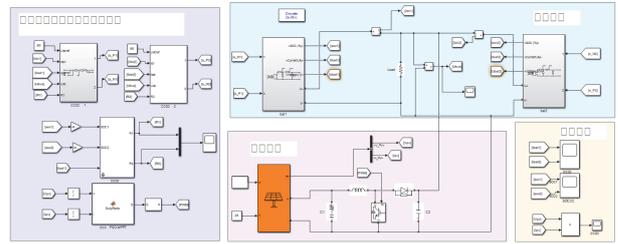


图 10 光储系统仿真模型

Fig. 10 Simulation model of photovoltaic storage system

为了评估改进方法的优越性,本文将幂指数形式的下垂控制与改进后的下垂系数控制进行了仿真对比实验。光储系统仿真参数的取值如表 1 所示。

表 1 光储系统各仿真参数

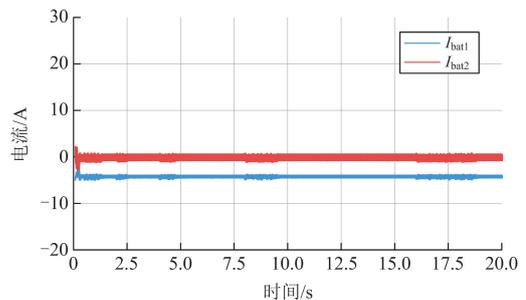
Table 1 Simulation parameters of photovoltaic storage system

仿真参数	取值
光伏电池额定功率/W	340
直流母线额定电压/V	60
直流负载阻值/ Ω	20
直流负载额定功率/W	180
蓄电池额定电压/V	48
蓄电池额定容量/Ah	0.5
n	3
p	5
R_D	0.5

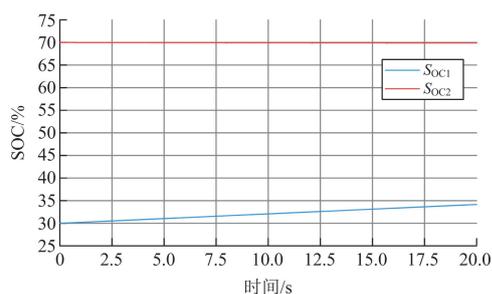
因本文的下垂系数在充、放电时系数是对称的,因此仿真仅设定充电状态作定性分析。

仿真工况一:两组蓄电池 SOC 相差较大的工况。两组蓄电池初始 SOC 分别为 30%、70%,设定光照强度维持 1200 W/m^2 ,蓄电池处于充电状态。观测两组蓄电池的下垂系数 R 、输出电流 I_{bat} 、SOC 水平,另外观测直流母线电压的波动情况。

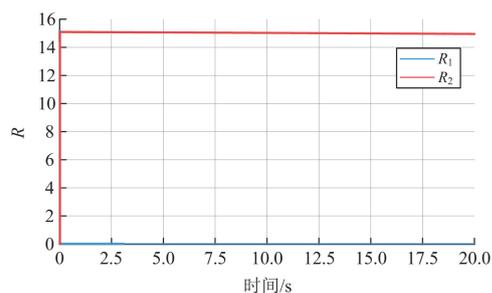
首先,对幂指数形式的下垂控制进行仿真验证,其仿真结果如图 11 所示;然后在同样的条件下对改进下垂系数的下垂控制进行仿真验证,仿真结果如图 12 所示。



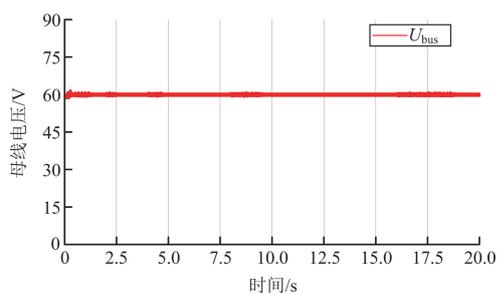
(a) 两组蓄电池的输出电流



(b) 两组蓄电池的SOC水平



(c) 两组蓄电池的下垂系数



(d) 直流母线电压

图 11 幂指数形式的下垂控制仿真结果(工况一)

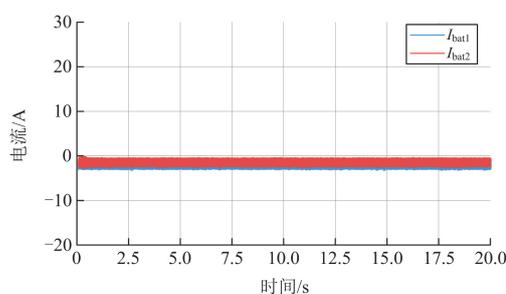
Fig. 11 Simulation results of droop control in power index function form (condition 1)

由图 11(c)可知, 在幂指数形式的下垂控制中, 两组蓄电池 SOC 水平相差较大时, R_2 取值很大, 最大约为 15, 而 R_1 的取值几乎为 0; 相应的 I_{bat2} 几乎为 0, S_{Oc2} 不变, 这相当于蓄电池 2 退出了系统, 整个储能系统的需求由蓄电池 1 承担, 大大降低了系统的可靠性; 在 R_2 取值很大、均分精度很低时, 图 11(d)显示母线电压也极不稳定, 出现了大幅度的振荡, 系统失去了稳定性。

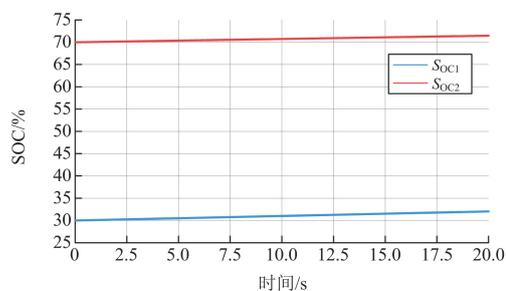
图 12 为工况一下改进下垂系数的下垂控制仿真结果。图 12 中: m 的值 SOC 与成线性反比, m 的表达式如式(19)所示。分析图 12, 在改进下垂系数的下垂控制中, 尽管两组蓄电池 SOC 水平相差较大, R_2 未超过 1.6 且 R_1 不接近 0; 由图 12(a)与 12(d)可以看出, I_{bat1} 与 I_{bat2} 之间的分配更为合理, 没有出现电流几乎为 0 的情况; 即使 SOC 相差很大, 改

进下垂控制也没有影响到母线电压的稳定。由此, 可以得出在 SOC 相差时间较大的工况下, 改进下垂控制对功率的分配更为合理。

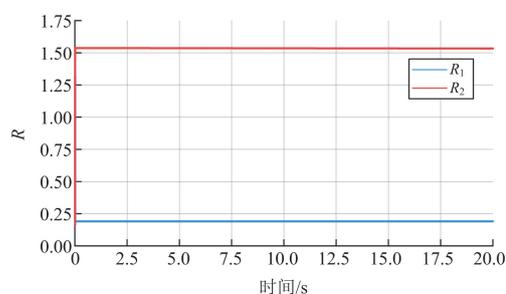
对比两组 SOC 水平的变化, 使用幂指数形式系数的 S_{Oc2} 在 20 s 内仅变化了 0.047%, 蓄电池 2 几乎退出运行; 而使用本文提出的下垂系数形式的 S_{Oc2} 变化了约 0.52%, 较幂指数形式系数提高了一个数量级。



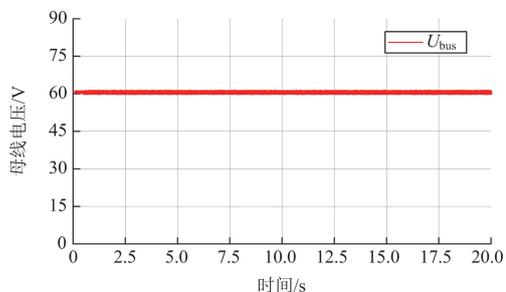
(a) 两组蓄电池的输出电流



(b) 两组蓄电池的SOC水平



(c) 两组蓄电池的下垂系数



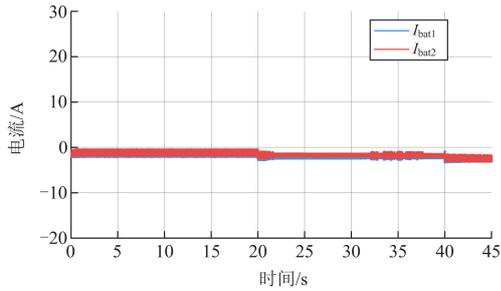
(d) 直流母线电压

图 12 改进下垂系数的下垂控制仿真结果(工况一)

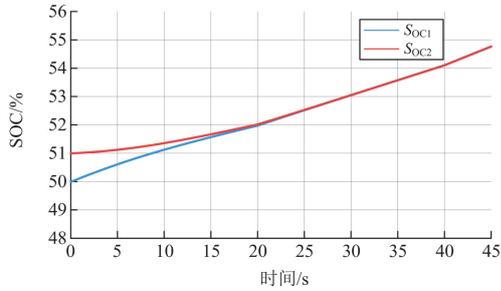
Fig. 12 Simulation results of droop control with improved droop coefficient (condition 1)

仿真工况二：两组蓄电池初始 SOC 分别为 50%、51%，设定初始光照强度为 1000 W/m^2 ，在 20 s、40 s 时递增 200 W/m^2 ，进行完整的 SOC 均衡测试，蓄电池此时处在充电状态。观测两组蓄电池的下垂系数 R 、输出电流 I_{bat} 、SOC 水平，另外观测直流母线电压的波动情况。

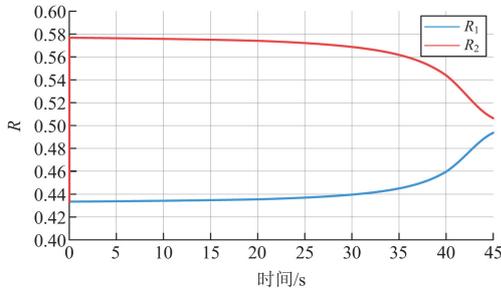
图 13 为幂指数形式的下垂控制仿真结果(工



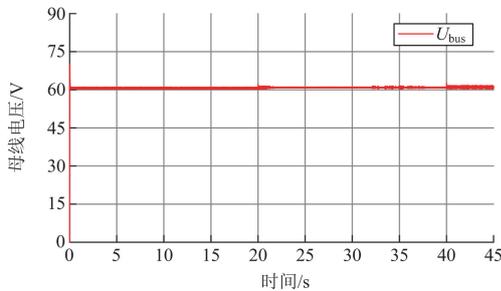
(a) 两组蓄电池的输出电流



(b) 两组蓄电池的SOC水平



(c) 两组蓄电池的下垂系数

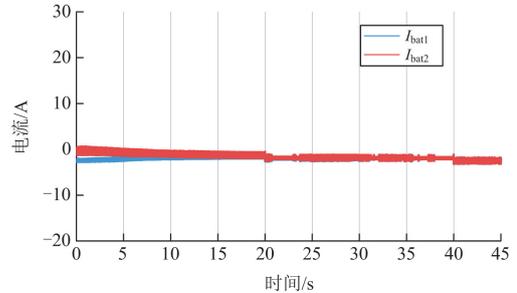


(d) 直流母线电压

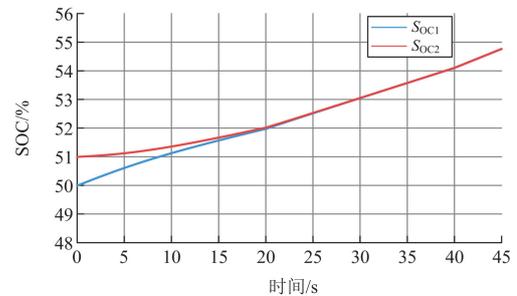
图 13 幂指数形式的下垂控制仿真结果(工况二)
Fig. 13 Simulation results of droop control in power index function form (condition 2)

况二)。由图 13 可以看出，SOC 差距较小时，两组蓄电池的输出电流差距很小，幂指数下垂控制 SOC 均衡时长为 45 s；两组下垂系数的大小也很接近，因此增加了 SOC 均衡所需时间，且其均分精度较差。

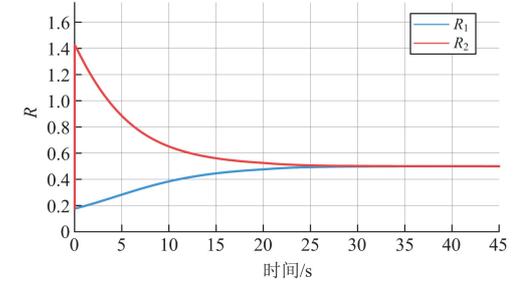
使用改进下垂系数的下垂控制仿真结果(工况二)如图 14 所示。从图 14(b)可以看出，系统达到 SOC



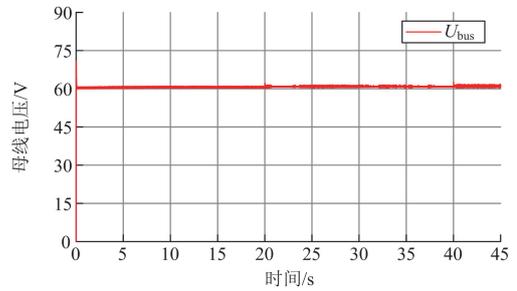
(a) 两组蓄电池的输出电流



(b) 两组蓄电池的SOC水平



(c) 两组蓄电池的下垂系数



(d) 直流母线电压

图 14 改进下垂系数的下垂控制仿真结果(工况二)
Fig. 14 Simulation results of droop control with improved droop coefficient (condition 2)

均衡所需的时间约为 30 s; 而从图 14(c)中可以观察到, 当 SOC 差距较小时, 两组蓄电池的下垂系数依然能够保持较大的比例, 并且其变化平滑, 表明功率均分精度较高。与此同时, 蓄电池的输出电流响应也更加敏感。

通过上述仿真结果的分析, 可以得出以下结论。

1) 改进下垂系数的下垂控制在 SOC 差距较小的情况下, 能够保持较快的 SOC 均衡速度, 在该仿真条件下, 相比传统幂指数形式, 均衡时间缩短约 25%。

2) 在 SOC 均衡过程中, 改进后的下垂系数变化更加平滑, 功率均分精度更高。

3) 在 SOC 差距较大的情况下, 改进下垂系数的下垂控制展现出更好的稳定性, 能够有效维持母线电压的稳定, 同时确保下垂系数的范围不会过大, 从而提高了系统的稳定性和可靠性。

4 结论

本文分析了传统下垂控制在蓄电池组 SOC 水平差距较大时稳定性降低、差距较小时均衡速度较慢以及 SOC 均衡过程中均分精度较差的问题。针对这些问题, 首先提出了反正切函数嵌套幂指数函数形式的改进下垂系数, 以限制下垂系数的最大值, 从而提升系统在 SOC 差距较大时的稳定性。然后, 在此基础上, 为了提高均衡速度, 向下垂系数的表达式中加入了增速因子, 以加快 SOC 差距较小时的均衡速度。最后, 进行了仿真验证, 结果表明, 改进下垂系数的下垂控制在稳定性、均分精度和均衡速度方面均有显著提升, 验证了本文所提改进方案的优越性。

参考文献

- [1] 程杉, 傅桐, 李泮洋, 等. 含高渗透可再生能源的配电网灵活性供需协同规划[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 1-12.
CHENG Shan, FU Tong, LI Fengyang, et al. Flexible supply demand collaborative planning for distribution networks with high penetration of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 1-12.
- [2] 李翠萍, 东哲民, 李军徽, 等. 提升配电网新能源消纳能力的分布式储能集群优化控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 76-83.
LI Cuiping, DONG Zhemin, LI Junhui, et al. Optimal control strategy of distributed energy storage cluster for prompting renewable energy accommodation in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 76-83.
- [3] 辛保安, 李明节, 贺静波, 等. 新型电力系统安全防御体系探究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5723-5732.
XIN Baoan, LI Mingjie, HE Jingbo, et al. Research on security defense system of new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5723-5732.
- [4] 宋昕一, 徐永海, 袁敞, 等. 孤岛直流微电网的多储能 SOC 稳定均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 49-59.
SONG Xinyi, XU Yonghai, YUAN Chang, et al. Multi-storage SOC stabilization and equalization control strategy for islanded DC microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20): 49-59.
- [5] 程子霞, 于洋, 柴旭峥, 等. 基于协同自适应控制的光储 VSG 运行控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 79-85.
CHENG Zixia, YU Yang, CHAI Xuzheng, et al. Research on operation control of a photovoltaic system with storage VSG based on cooperative adaptive control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 79-85.
- [6] 李建林, 梁策, 张则栋, 等. 新型电力系统下储能政策及商业模式分析[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 104-116.
LI Jianlin, LIANG Ce, ZHANG Zedong, et al. Analysis of energy storage policies and business models in new power system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 104-116.
- [7] 陈景文, 周媛, 李晓飞, 等. 光储直流微网混合储能控制策略研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(1): 14-20, 87.
CHEN Jingwen, ZHOU Yuan, LI Xiaofei, et al. Hybrid energy storage control strategy of optical storage DC microgrid[J]. Smart Power, 2022, 50(1): 14-20, 87.
- [8] MA Y, XIAO J, LIN H, et al. A novel battery integration method of modular multilevel converter with battery energy storage system for capacitor voltage ripple reduction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 12250-12261.
- [9] LASSETER R H, CHEN Z, PATTABIRAMAN D. Grid-forming inverters: a critical asset for the power grid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 925-935.
- [10] QORIA T, WU H, WANG X, et al. Variable virtual impedance-based overcurrent protection for grid-forming inverters: small-signal, large-signal analysis and improvement[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(5): 3324-3336.
- [11] ANGIZEH F, BAE J, CHEN J, et al. Impact assessment framework for grid integration of energy storage systems and renewable energy sources toward clean energy transition[J]. IEEE Access, 2023, 11: 134995-135005.
- [12] 李世龙, 李龙江, 刘欣博, 等. 一种增强稳定性的储能变流器线性自抗扰控制参数整定方法[J]. 中国电力, 2024, 57(10): 25-35.
LI Shilong, LI Longjiang, LIU Xinbo, et al. Linear active disturbance rejection control parameter tuning method for energy storage converter with enhanced stability[J]. Electric Power, 2024, 57(10): 25-35.
- [13] 李登峰, 张澳归, 刘育明, 等. 考虑设备安全的新能源场站参与电网频率协调控制方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(9): 8-15, 96.
LI Dengfeng, ZHANG Aogui, LIU Yuming, et al. Frequency coordination control method of power system contained renewable energy stations considering equipment safety[J]. Smart Power, 2023, 51(9): 8-15, 96.

- [14] 么钟然, 孙丽颖. 考虑线路阻抗的分布式储能 SOC 均衡控制策略[J]. 中国电力, 2024, 57(9): 238-246.
YAO Zhongran, SUN Liying. Balanced control strategy of distributed energy storage SOC considering line impedance[J]. Electric Power, 2024, 57(9): 238-246.
- [15] 夏向阳, 谭欣欣, 单周平, 等. 储能电站锂离子电池本体安全关键技术及新技术应用情况[J]. 中国电力, 2024, 57(11): 1-17.
XIA Xiangyang, TAN Xinxin, SHAN Zhouping, et al. Key technology and development prospect of ontology safety for lithium-ion battery storage power stations[J]. Electric Power, 2024, 57(11): 1-17.
- [16] 朱晓荣, 韩啸. 储能电池与常规机组配合参与一次调频的自适应控制策略[J]. 电测与仪表, 2023, 60(9): 34-42.
ZHU Xiaorong, HAN Xiao. The adaptive control strategy of energy storage battery cooperating with conventional generating units to participate in primary frequency regulation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(9): 34-42.
- [17] 曾国辉, 朱相臣, 曾志伟, 等. 具有公共低压直流母线电压支撑功能的储能单元 SOC 自动均衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 7160-7170.
ZENG Guohui, ZHU Xiangchen, ZENG Zhiwei, et al. Energy storage unit state-of-charge automatic equalization control strategy with common LVDC bus voltage support function[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7160-7170.
- [18] 王建元, 李南南. 基于一致性算法的直流微电网分布式储能系统能量控制策略[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(2): 73-81.
WANG Jianyuan, LI Nannan. Energy control strategy of DC microgrid distributed energy storage system based on consensus algorithm[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(2): 73-81.
- [19] 李军徽, 孙大朋, 朱星旭, 等. 光伏高渗透率下分布式储能群间协同的电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 47-56.
LI Junhui, SUN Dapeng, ZHU Xingxu, et al. Voltage regulation strategy for distributed energy storage considering coordination among clusters with high penetration of photovoltaics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 47-56.
- [20] 薛皓, 何晋伟, 郭培健. 基于级联 H 桥变换器的电池储能系统容错控制[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3418-3430.
XUE Hao, HE Jinwei, GUO Peijian. Fault-tolerance control of battery energy storage system based on cascaded H-bridge converter[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3418-3430.
- [21] 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, 2023, 43(7): 44-50.
- [22] 郑云平, 亚夏尔·吐尔洪. 基于 VSG 技术的风—光—储系统自适应调频控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 12-19.
ZHENG Yunping, YAXAR Turgun. Research on adaptive frequency modulation control strategy of wind-PV-storage system based on VSG technology[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 12-19.
- [23] JAFARPOUR S, PURBA V, JOHNSON B B, et al. Singular perturbation and small-signal stability for inverter networks[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2022, 9(2): 979-992.
- [24] 明远山, 胡慧慧, 刘凯旋, 等. 孤岛模式下直流微网中储能单元 SOC 均衡控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 57-64.
MING Yuanshan, HU Huihui, LIU Kaixuan, et al. Research on SOC balance control strategy of energy storage unit in DC microgrid in island mode[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 57-64.
- [25] 马海宁, 王鲁杨, 仇成, 等. 直流微电网不同荷电状态多储能系统分布式控制[J]. 电力建设, 2022, 43(7): 87-95.
MA Haining, WANG Luyang, QIU Cheng, et al. Research on distributed control of multiple energy storage systems with different SOC in DC microgrid[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 87-95.
- [26] 马文忠, 孙伟, 王玉生, 等. 基于 MMC 的分布式储能系统及其快速 SOC 均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 1-11.
MA Wenzhong, SUN Wei, WANG Yusheng, et al. Distributed energy storage system based on MMC and rapid SOC balancing control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 1-11.
- [27] 蔡福霖, 胡泽春, 曹敏健, 等. 提升新能源消纳能力的集中式与分布式电池储能协同规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(20): 23-32.
CAI Fulin, HU Zechun, CAO Minjian, et al. Coordinated planning of centralized and distributed battery energy storage for improving renewable energy accommodation capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(20): 23-32.
- [28] 李鹏程, 张纯江, 袁然然, 等. 改进 SOC 下垂控制的分布式储能系统负荷电流分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3746-3754.
LI Pengcheng, ZHANG Chunjiang, YUAN Ranran, et al. Load current sharing method of distributed energy storage systems by improved SOC drooping control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3746-3754.

收稿日期: 2024-03-31; 修回日期: 2024-08-25

作者简介:

程子霞(1974—), 女, 博士, 副教授, 主要从事高电压与绝缘技术教学与研究方面的工作; E-mail: chzx@zsu.edu.cn

丁青波(2000—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要从事光伏发电系统及其控制方面的工作; E-mail: sxywwq3034@163.com

柴旭峥(1978—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统运行、分析与控制方面的工作。E-mail: chaixuzheng@126.com

(编辑 石晋美)