

# 计及电池荷电状态的储能系统控制策略优化研究

王明琦<sup>1</sup>, 夏向阳<sup>1\*</sup>, 赵晓悦<sup>1</sup>, 黄如<sup>2</sup>, 邓化龙<sup>2</sup>, 刘代飞<sup>1</sup>, 蔡昱宽<sup>3</sup>

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410114; 2. 湖南长高森源电力设备有限公司, 湖南省 衡阳市 421000; 3. 国家电网江苏省苏州供电分公司, 江苏省 苏州市 215008)

## Research on Optimization of Control Strategy for Energy Storage Systems Considering Battery State of Charge

WANG Mingqi<sup>1</sup>, XIA Xiangyang<sup>1\*</sup>, ZHAO Xiaoyue<sup>1</sup>, HUANG Ru<sup>2</sup>, DENG Hualong<sup>2</sup>, LIU Daifei<sup>1</sup>, CAI Yukuan<sup>3</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan Province, China; 2. Hunan Changgao Senyuan Electric Power Equipment Co., Ltd., Hengyang 421000, Hunan Province, China; 3. Suzhou Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suzhou 215008, Jiangsu Province, China)

**摘要:**【目的】由于电池单体的荷电状态(state of charge, SOC)和容量的不一致性, 分布式储能系统存在SOC均衡速度慢和电流分配精度低等问题。为了解决上述问题, 针对不同容量的储能单元提出了一种计及电池SOC的储能系统控制策略。【方法】该策略对下垂控制做进一步改进, 采用反正切嵌套幂函数的形式将SOC差值与下垂系数结合起来, 同时使下垂系数中的变加速因子取值与SOC差值相结合, 从而实现较好的均衡效果。此外, 加入了虚拟电压和直流母线电压补偿, 在保证母线电压稳定的基础上实现了储能单元输出电流的精准分配。【结果】采用优化后的变加速因子时, 储能单元的SOC均衡时间比采用固定加速因子时缩短大约50%, 并且在未影响SOC均衡效果的基础上储能单元的输出电流能够与容量比保持一致。【结论】该控制策略提高了不同容量储能单元之间的SOC均衡速度和输出电流分配精度。

**关键词:** 分布式储能系统; 微电网; 电池; 荷电状态; 下垂控制; 变加速因子; 均衡速度; 电压补偿

**ABSTRACT:** [Objectives] Distributed energy storage systems exhibit slow state of charge (SOC) equalization and low current distribution accuracy due to inconsistency in the SOC and capacity among battery cells. To address these issues, a control strategy for energy storage systems that considers SOC for energy storage units with different capacities is proposed. [Methods] The strategy improves

droop control by integrating the SOC difference with the droop coefficient using an inverse tangent nested power function. The variable acceleration factor in the droop coefficient is dynamically adjusted according to the SOC difference to achieve better equalization. Additionally, virtual voltage and DC bus voltage compensation are incorporated to achieve accurate output current distribution while ensuring bus voltage stability. [Results] The optimized variable acceleration factor reduces the SOC equalization time by approximately 50% compared to the fixed acceleration factor. The output current remains consistent with the capacity ratio without compromising SOC equalization performance. [Conclusions] This control strategy improves SOC equalization speed and output current distribution accuracy among energy storage units with different capacities.

**KEY WORDS:** distributed energy storage system; microgrid; battery; state of charge; droop control; variable acceleration factor; equalization speed; voltage compensation

## 0 引言

随着社会经济的快速发展, 环境污染和能源枯竭等问题逐渐凸显, 具有清洁性和可再生性等优点的可再生能源组成的微电网成为研究热点<sup>[1-5]</sup>。但太阳能、风能等新能源发电具有间歇性和随机性, 而孤岛微电网通常独立运行, 可能会引起电压和功率的波动<sup>[6]</sup>。因此, 孤岛运行的直流微电网一般采用分布式储能系统(distributed energy storage system, DESS)来保证稳定性和供电的可靠性<sup>[7-11]</sup>。DESS具有传输损耗小、可靠性高、储

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51977014); 湖南省教育厅科学研究重点项目(22A0230)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51977014); Key Scientific Research Project of Hunan Provincial Department of Education (22A0230).

能装置安装灵活等优点,且各储能单元通过逆变器并联于直流母线处,以维持系统的电压和功率稳定,从而提高系统的供电可靠性<sup>[12-13]</sup>。

DESS在实际使用过程中存在不一致性,主要体现在各储能单元的荷电状态(state of charge, SOC)、容量差异等方面,使其在系统中的出力不一致,从而会使各储能单元陆续达到充放电极限而退出系统,导致微电网系统崩溃<sup>[14]</sup>。为了实现电池的SOC均衡,文献[15-16]提出了不同的锂离子电池动态均衡策略,能够实现锂离子电池组内部各个单元的SOC均衡,但都是基于电池管理系统的SOC均衡策略,并不适用于DESS。

为了实现DESS的SOC均衡,国内外学者提出将传统下垂控制中的固定下垂系数与各储能单元的SOC结合起来的方法。其中,文献[17]利用加入SOC因子补偿的下垂控制实现了各储能单元的SOC平衡,但是该方案基于 $P$ - $f$ ( $P$ 、 $f$ 分别表示功率、频率)下垂控制,不适用于直流微电网研究。文献[18]将下垂系数与单元SOC的 $n$ 次幂函数结合起来,实现了各储能单元功率按SOC合理分配。文献[19]提出了一种SOC幂指数型下垂控制策略,基于单元SOC与其平均值之差的幂指数来动态调整下垂系数,提高了系统的收敛速度和功率分配精度。然而,上述改进的SOC下垂控制方法大多基于幂函数和指数函数,未考虑到改进后下垂系数的范围问题,可能会造成系统的不稳定以及母线电压的跌落。文献[20]引入双曲正切函数实现下垂系数的自适应调节,利用双曲正切函数的特性,限制下垂系数的范围并对其进行调整,从而实现SOC的快速均衡。文献[21]利用反正切函数和幂函数各自的优点提出一种改进SOC均衡下垂控制策略,同时引入变加速因子,在SOC差异较小时进一步加快均衡速度,但其变加速因子不是线性连续变化的,这会导致输出功率在变加速因子跳变时突变,进而对系统的稳定性产生影响。

同时,在微电网的实际应用中,线路阻抗存在差异性,负荷分配精度较低,而上述大多数研究未考虑到输出电流的精准分配问题。为了降低线路阻抗对系统的影响,文献[22]对线路阻抗进

行测量并将其补偿到下垂系数中,提高了电流分配精度,但在实际应用中环境因素的干扰会降低该方法的精度。文献[23]利用虚拟额定功率来消除线路阻抗对电流分配的影响,但在储能单元容量不同时无法实现SOC均衡。

综合上述分析可知,目前针对微电网下DESS的控制策略研究存在以下问题:大多数下垂控制的改进策略虽然使均衡速率得到一定程度的提高,但是存在下垂系数范围过大、线路阻抗影响下电流分配精度不足等问题,且普遍忽略储能单元容量差异的实际影响。为了解决这些问题,本文针对不同容量的储能单元提出一种计及电池荷电状态的储能系统控制策略。该策略采用反正切嵌套幂函数的形式,将SOC差值与下垂系数结合起来,并对下垂系数中的变加速因子进行优化,提高储能单元SOC的均衡速度。同时,加入虚拟电压和直流母线电压补偿,在保证母线电压稳定的基础上实现不同容量储能单元输出电流的精准分配。

## 1 孤岛直流微电网系统结构

直流微电网系统在孤岛模式下的典型结构如图1所示,其主要由分布式发电单元(如光伏、风电单元等)、DESS、储能变流器和负载组成<sup>[24-26]</sup>。其中储能系统在保证系统稳定运行过程中发挥着至关重要的作用。但是,原材料和制作工艺的不同造成了各储能单元的初始SOC和容量各不相同,在实际使用过程中会导致系统运行崩溃和储能系统寿命缩短。因此,在系统运行过程中保证

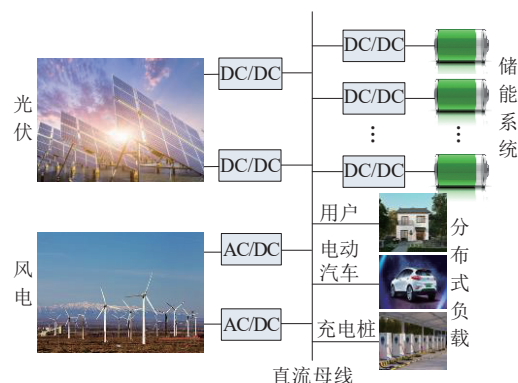


图1 直流微电网典型结构(孤岛模式)

Fig. 1 Typical structure of DC microgrid (island mode)

不同容量储能单元的SOC均衡速度和电流分配精度具有重要意义。

## 2 计及电池SOC的下垂控制策略

### 2.1 传统下垂控制策略

下垂控制具有不依赖高速通信、即插即用的优点,被广泛应用于分布式微电网系统中。传统U-I(U、I分别表示电压、电流)下垂控制表达式如下:

$$u_{\text{dcrefi}} = u_{\text{dc}}^* - R_i i_{oi} \quad (1)$$

式中:  $u_{\text{dcrefi}}$  为第  $i$  个储能单元变换器的输出电压参考值;  $u_{\text{dc}}^*$  为直流母线电压参考信号;  $R_i$ 、 $i_{oi}$  分别为第  $i$  个储能单元变换器的下垂系数、输出电流。

图2为2个储能单元的等效模型。由此可得传统下垂控制下储能单元输出电流与虚拟阻抗、线路阻抗的和成反比,即

$$\frac{i_{oi}}{i_{oj}} = \frac{R_j + R_{\text{line}j}}{R_i + R_{\text{line}i}} \quad (2)$$

式中:  $R_j$ 、 $i_{oj}$  分别为储能单元  $j$  的虚拟阻抗、输出电流;  $R_{\text{line}i}$ 、 $R_{\text{line}j}$  分别为储能单元  $i$ 、 $j$  的线路阻抗。

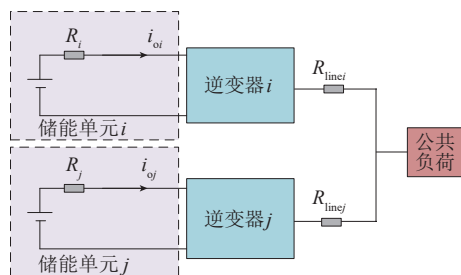


图2 储能单元等效模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of energy storage unit

综上所述,传统下垂控制没有考虑不同储能单元的SOC情况,输出电流也只能按照特定的比例进行分配。因此,传统下垂控制不能实现不同储能单元之间的SOC均衡和输出电流的精准分配,同时还会不可避免地带来一定程度的直流母线压降。

### 2.2 考虑SOC均衡的下垂控制策略

为了使各储能单元能够实现SOC自均衡,本文采用改进型SOC下垂控制,使用反正切嵌套幂函数的形式将下垂系数与各储能单元的SOC结合

起来,此时下垂系数表达式为

$$R_i = \begin{cases} R_0 + \frac{R_0}{\pi/2} \arctan[p(S_{\text{OC}i}^n - S_{\text{OCA}}^n)], & i_{oi} < 0 \\ R_0 + \frac{R_0}{\pi/2} \arctan[-p(S_{\text{OC}i}^n - S_{\text{OCA}}^n)], & i_{oi} > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $R_0$  为初始下垂系数;  $S_{\text{OC}i}$  为储能单元  $i$  的SOC值;  $S_{\text{OCA}}$  为全部储能单元的SOC平均值,由动态一致性算法得出;  $n$ 、 $p$  为调速因子,参考文献[21]的仿真结果,相比于  $n$ , 增大  $p$  的加速作用更加明显,此处  $n=2$  最佳,本文将重点优化调速因子  $p$  以达到更好的均衡效果。

通常情况下,各储能单元的SOC值采用安时积分法来估算:

$$S_{\text{OC}i} = S_{\text{OC}i}(0) - \int \frac{i_{oi}}{C_{ei}} dt \quad (4)$$

式中:  $S_{\text{OC}i}(0)$  为第  $i$  个储能单元的初始SOC值;  $C_{ei}$  为第  $i$  个储能单元的容量。

对式(4)求导,并结合式(1)可得

$$\dot{S}_{\text{OC}i} = -\frac{u_{\text{dcrefi}} - u_{\text{dc}}^*}{C_{ei} R_i} \quad (5)$$

由式(5)可知,各储能单元的SOC变化率与容量有关,当储能单元的容量不一致时,SOC均衡效果可能不理想。因此,为了消除容量对SOC均衡的影响,对上述下垂系数做进一步改进,表达式更新为

$$R'_i = \frac{C_{\text{emax}}}{C_{ei}} R_i \quad (6)$$

式中  $C_{\text{emax}}$  为各储能单元容量的最大值。

此时,各储能单元的SOC变化率为

$$\dot{S}_{\text{OC}i} = -\frac{u_{\text{dcrefi}} - u_{\text{dc}}^*}{C_{ei} R'_i} = -\frac{u_{\text{dcrefi}} - u_{\text{dc}}^*}{C_{\text{emax}} R_i} \quad (7)$$

下垂系数改进后各储能单元的SOC变化率与容量无关,即该改进型SOC下垂控制策略在储能单元容量不相等时同样适用。

下垂系数为反正切函数嵌套幂函数的形式,则在放电过程中下垂系数单调递减且最大变化范围始终保持在  $2R_0$  范围之内,如图3所示。以2个并联的相同容量储能单元的放电过程为例,当  $S_{\text{OC}1} > S_{\text{OC}2}$  时,有  $R_1 < R_2$ ,即SOC较大的储能单元下垂系数较小,输出功率则相对较大。反之,SOC较小的储能单元下垂系数较大,输出功率则相对较小。

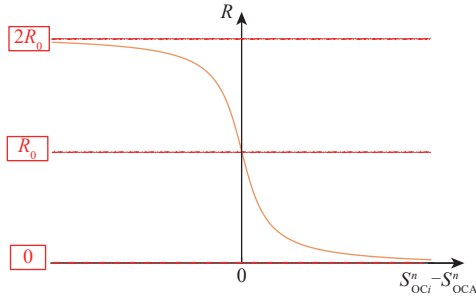


图3 放电过程下垂系数变化曲线

Fig. 3 Variation curve of droop coefficient during discharge process

### 2.3 均衡性分析

假设上述2个储能单元满足  $S_{OC1}(0) > S_{OC2}(0)$ ，则其SOC差值  $\Delta S_{OC}$  的导数表示为

$$\Delta \dot{S}_{OC} = \frac{i_{o2} - i_{o1}}{C_e} \quad (8)$$

式中  $C_e$  为储能单元的容量。

联立式(1)、(3)、(8)，可得

$$\Delta \dot{S}_{OC} = \frac{u_{dc}^* - u_{dcref}}{C_e R_0} \cdot \left\{ \frac{1}{1 + 2/\pi \arctan[p(S_{OCA}^2 - S_{OC2}^2)]} - \frac{1}{1 + 2/\pi \arctan[p(S_{OCA}^2 - S_{OC1}^2)]} \right\} \quad (9)$$

考虑到  $1/(1+x)$  和  $\arctan x$  与其一阶泰勒展开式可近似相等，可得

$$\Delta \dot{S}_{OC} = \frac{2p(u_{dc}^* - u_{dcref})}{\pi C_e R_0} (S_{OC2}^2 - S_{OC1}^2) \quad (10)$$

由式(10)可知，当  $S_{OC1}(0) > S_{OC2}(0)$  时， $\Delta S_{OC}$  的导数小于零，然而  $\Delta S_{OC}$  的初值大于零，因此  $\Delta S_{OC}$  的变化趋势为逐渐减小至零。基于上述分析，该控制策略可以实现各储能单元之间的SOC均衡。

### 2.4 稳定性分析

由式(1)和图2可构建储能单元1的SOC下垂控制结构，如图4所示，其中： $u_{dc1}$ 、 $u_{dc2}$ 分别为储能单元1、2的输出电压； $i_{dc1}$ 为储能单元输出电

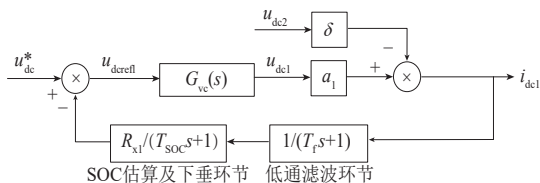


图4 储能单元1的SOC下垂控制结构

Fig. 4 SOC droop control structure of energy storage unit 1

流； $R_{x1}$ 为下垂系数； $T_{SOC}$ 为惯性时间常数； $T_f$ 为电流低通滤波器的时间常数；其他系数 $\delta$ 、 $a_1$ 与  $R_{line1}$ 、 $R_{line2}$ 、负载电阻  $R_{load}$  相关；输出电压的闭环传递函数  $G_{vc}(s)$  可近似为1，SOC估算可等效为惯性环节。

此处忽略系统扰动项  $u_{dc2}$  的影响，根据图4可推导出储能单元1的SOC下垂控制闭环传递函数，即

$$G_1(s) = \frac{a_1 T_{SOC} T_f s^2 + a_1 (T_{SOC} + T_f) s + a_1}{T_{SOC} T_f s^2 + (T_{SOC} + T_f) s + 1 + a_1 R_{x1}} \quad (11)$$

其中，

$$a_1 = \frac{R_{line2} + R_{load}}{R_{line1} R_{line2} + R_{line1} R_{load} + R_{line2} R_{load}} \quad (12)$$

由式(11)可列出劳斯阵列，即

$$\begin{array}{ccc} s^2 & T_{SOC} T_f & 1 + a_1 R_{x1} \\ s^1 & T_{SOC} + T_f & 0 \\ s^0 & 1 + a_1 R_{x1} & \end{array} \quad (13)$$

劳斯列阵的第一列系数都为正值，说明该SOC下垂控制系统稳定。因此，系统的稳定性基本不会受到下垂系数的影响。

## 3 储能系统控制方案优化

### 3.1 变加速因子优化

目前已有的基于反正切嵌套幂函数下垂控制改进方案主要是针对变加速因子的优化，虽然这些改进方案在一定程度上提高了储能单元SOC和输出功率的均衡速度，但是由于此时变加速因子不是线性连续变化的，这会导致输出功率在变加速因子跳变时突变，进而对系统的稳定性产生影响。为解决上述问题，本文将加速因子的变化过程进行优化，建立变加速因子与储能单元之间SOC差值的函数关系，使得变加速因子随着  $\Delta S_{OC}$  减小而增大，直至增大到最大值。该方法不仅能加快储能单元的SOC均衡速度，而且也能保证储能单元的功率平稳变化。

但是，加速因子的取值应有一定的限制，取值过小会导致调节频率增加，从而使均衡速度不理想；取值过大则有可能导致调节幅度过大，从而影响均衡效果。因此，变加速因子的取值应与  $\Delta S_{OC}$  相结合，使其能够保持在合理范围内，从而实现较好的均衡效果。

经过多次的仿真验证对比,优化后的变加速因子设计为

$$p = \begin{cases} -1\,000[\Delta S_{OC} - (\Delta S_{OC0} - 0.1)] + 185, \\ \Delta S_{OC0} - 0.01 < \Delta S_{OC} \leq \Delta S_{OC0} \\ 95, 0 \leq \Delta S_{OC} \leq \Delta S_{OC0} - 0.01 \end{cases} \quad (14)$$

式中 $\Delta S_{OC0}$ 为各储能单元SOC初始值的最大值与最小值之差。

在本文优化方案中,约束了变加速因子 $p$ 随 $\Delta S_{OC}$ 变化的范围,通过调节 $p$ 的变化大小和速度,使 $p$ 可以在合理范围内逐渐增大到最大值,在保证系统稳定的情况下提高SOC的均衡速度。

### 3.2 输出电流精确分配

定义 $u_i$ 、 $u_j$ 分别为储能单元 $i$ 、 $j$ 由于引入虚拟阻抗而产生的虚拟电压,如式(15)所示。如果能够保证各储能单元的虚拟电压相等,则输出电流与下垂系数直接的比例关系就成立。

$$\begin{cases} u_i = i_{oi} R_i \\ u_j = i_{oj} R_j \end{cases} \quad (15)$$

为使输出电流可以按一定比例精准分配,本文在传统 $U-I$ 下垂控制的基础上加入虚拟电压补偿项 $\Delta u_{i1}$ :

$$\Delta u_{i1} = G_1(s)(u_{avg} - u_i) \quad (16)$$

式中 $u_{avg}$ 为虚拟电压平均值。

在PI控制器的调节下,各储能单元的虚拟电压值趋于一致,式(15)中的虚拟电压满足 $u_i = u_j$ ,各储能单元的输出电流与虚拟阻抗成反比,消除了虚拟电压的影响,实现了输出电流的精准分配。

### 3.3 直流母线电压补偿

由于引入了下垂控制,必然会导致直流母线电压的下降。原则上,直流母线电压偏差不应超过 $\pm 5\%$ ,为了使直流母线电压保持在可允许的范围内,本文采用PI控制器使平均母线电压跟踪给定值,其中母线电压的补偿项为 $\Delta u_{i2}$ ,如式(17)所示,从而改善了直流母线电压跌落问题。

$$\Delta u_{i2} = G_2(s)(u_{dc}^* - u_{dcavg}) \quad (17)$$

式中: $G_2(s)$ 为电压偏差补偿环节的传递函数; $u_{dcavg}$ 为平均母线电压。

则本文改进的下垂控制策略中各储能单元的输出电压参考值为

$$u_{dcrefi} = u_{dc}^* - R_i i_{oi} + \Delta u_{i1} + \Delta u_{i2} \quad (18)$$

### 3.4 动态一致性算法

一致性算法采用状态反馈或输出反馈以实现目标智能体的状态一致性,广泛应用于分布式控制领域<sup>[27-29]</sup>。本文采用动态一致性算法估算 $S_{OCA}$ 、 $u_{avg}$ 和 $u_{dcavg}$ ,从而提高系统控制的灵活性和稳定性。

分布式系统的通信拓扑可以用无向连通图 $G = (V, E, A)$ 来表示,其中: $V = \{v_1, \dots, v_N\}$ 表示系统 $N$ 个节点的集合(每个节点代表1个智能体); $E \in V \times V$ 表示边集; $A$ 表示邻接矩阵。本文将DESS看作由 $N$ 个节点和一系列边 $E$ 组成的通信网络,每个储能单元被视为1个节点,不同节点之间可以进行双向通信。每个储能单元能够与其相邻的储能单元进行相互通信,交换各自的状态信息。同时,根据自身状态信息和获得的相邻储能单元的状态信息来更新其状态信息。

由文献[30]中的动态一致性算法可得

$$\begin{cases} X_{iavg}(k+1) = X_i(k) + \varepsilon \sum_{j \in N} \theta_{ij}(k+1) \\ \theta_{ij}(k+1) = \theta_{ij}(k) + \alpha_{ij} [X_{javg}(k) - X_{iavg}(k)] \end{cases} \quad (19)$$

式中: $i \neq j$ ;  $X_{iavg}(k+1)$ 为储能单元 $i$ 第 $k+1$ 次对全局平均值的估计; $X_i(k)$ 为储能单元 $i$ 第 $k$ 次的取值; $X_{iavg}(k)$ 、 $X_{javg}(k)$ 分别为储能单元 $i$ 、 $j$ 第 $k$ 次对全局平均值的估计; $\theta_{ij}(k)$ 为相邻2个储能单元第 $k$ 次估计量的累计误差; $\varepsilon$ 为通信权重因子; $\alpha_{ij}$ 为储能单元 $i$ 、 $j$ 之间的通信状态,当二者通信正常时 $\alpha_{ij}=1$ ,通信故障时 $\alpha_{ij}=0$ 。

## 4 仿真实证

### 4.1 仿真模型

基于上述的理论分析,在MATLAB/Simulink中搭建包含2个储能单元的DESS仿真模型。本文提出的计及电池SOC的储能系统控制策略整体控制框图如图5所示。具体仿真参数如下:直流母线电压为60 V,蓄电池电压为48 V,储能单元容量为3 A·h,初始放电下垂系数为0.5,2个蓄电池储能单元初始SOC分别为53%和48%。本文共设计了两类仿真实验:1)仿真分析采用固定放大因子、优化后变加速因子的SOC和功率均衡过程,并对结果进行对比分析;2)仿真分析不同容量的

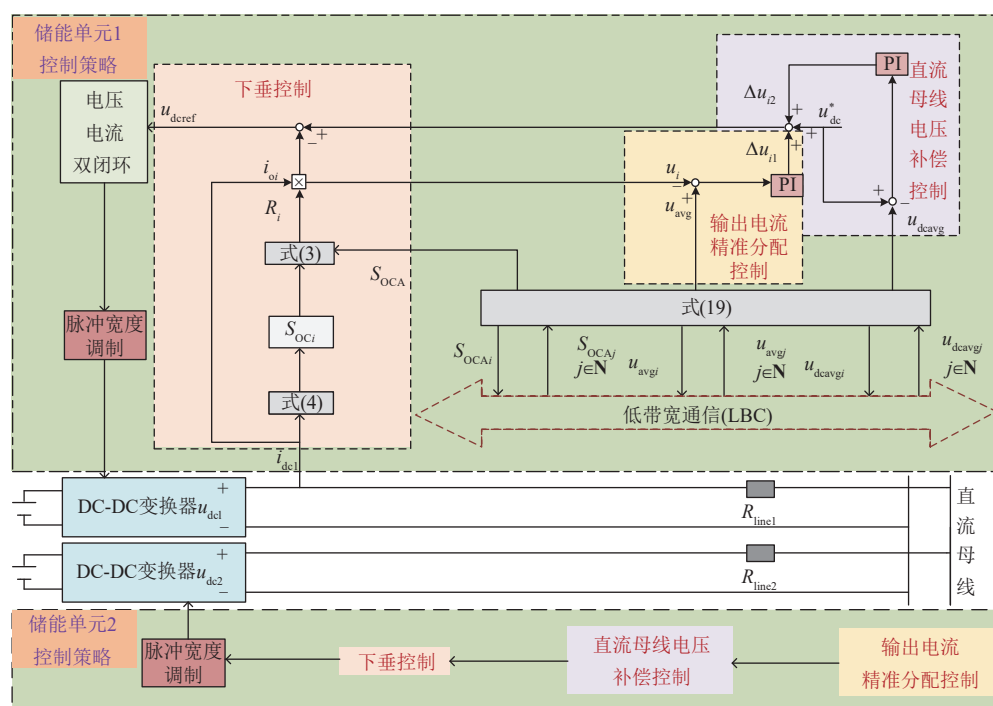


图5 分布式储能系统整体控制框图

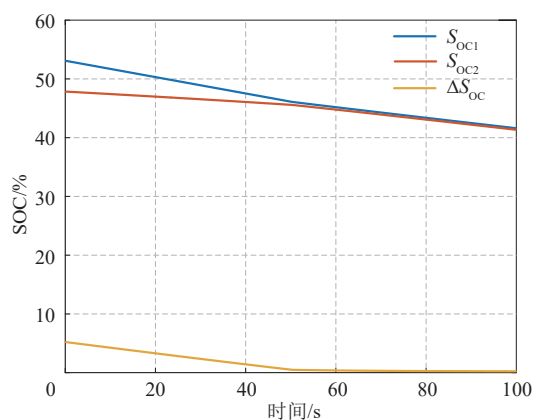
Fig. 5 Block diagram of overall control of distributed energy storage system

储能单元SOC均衡和电流分配效果，验证所提策略的可行性和优越性。

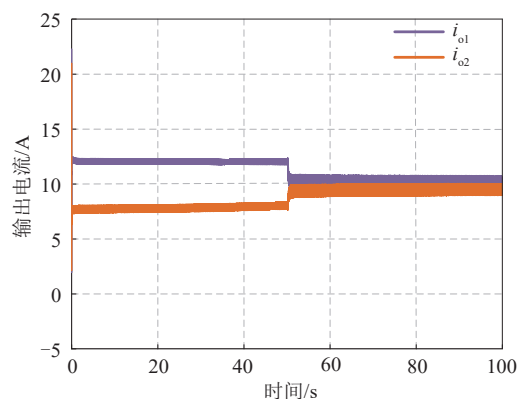
## 4.2 不同加速因子仿真效果

### 4.2.1 固定加速因子仿真效果

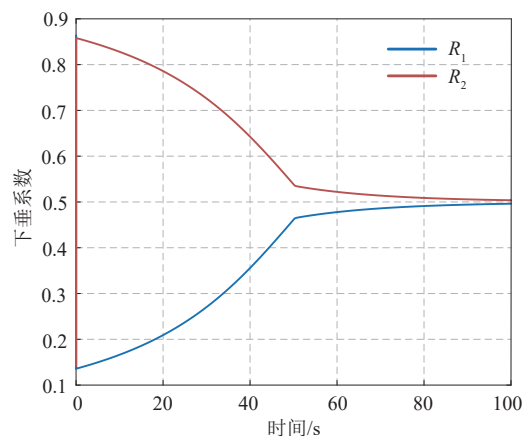
为验证优化后变加速因子的可行性和优越性，对采用固定加速因子的下垂控制策略进行仿真分析。其中，2个储能单元的初始荷电状态分别为53%和48%，设置固定加速因子 $p=85$ ，仿真波形如图6所示，可以看出，当传统固定加速因子为85时，储能单元的响应阶段持续时间较短，但是收敛阶段的持续时间较长，两储能单元的SOC在



(a) 各储能单元的SOC值及其差值



(b) 各储能单元的输出电流



(c) 各储能单元的下垂系数

图6  $p=85$ 时的仿真波形Fig. 6 Simulated waveforms at  $p=85$

100 s时还未达到完全均衡。

4.2.2 优化后变加速因子仿真效果

优化后的变加速因子不再为固定值，也没有发生阶梯跳变，而是根据两储能单元的 SOC 差值进行连续变化，并且增大到一定值后保持不变，如图 7 所示。

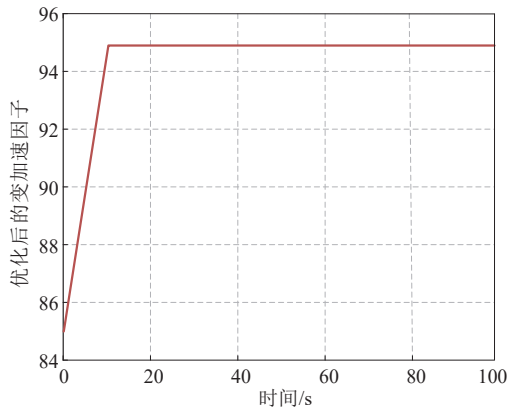
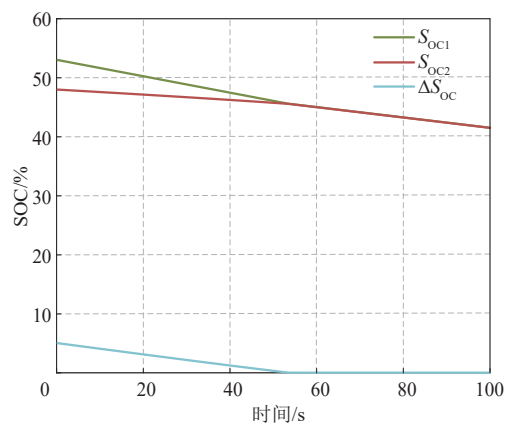


图 7 优化后的变加速因子波形

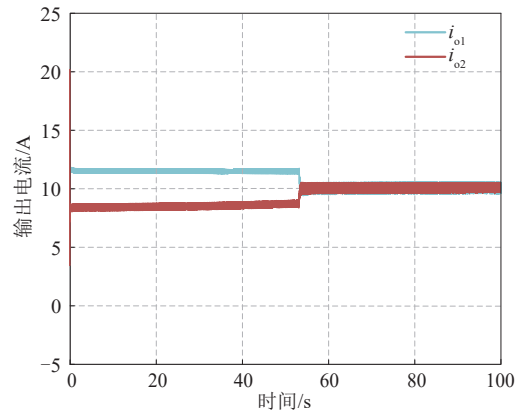
Fig. 7 Waveform of optimized variable acceleration factor

采用优化后变加速因子的仿真波形如图 8 所示，其中系统各参数均与采用固定加速因子仿真时一致。可以看出，当采用优化后的变加速因子时，2 个储能单元的 SOC 差值在 52.66 s 时已为 0，说明此时 2 个储能单元的 SOC 和输出电流已达到完全均衡；与使用固定加速因子的仿真结果相比，系统的均衡速度得到了显著提高。此外，对于额定容量较大的储能单元，通过式(5)可得，储能单元的 SOC 变化率会下降，由于初始 SOC 存在较大差异，因此 SOC 的均衡时间也会大大延长，此时本文所提出控制策略的均衡快速性就能得到更明显的体现。同时，由下垂系数变化曲线可以看出，下垂系数始终保持在  $2R_0$  之间变化，并在 52.66 s 时达到一致，变为初始下垂系数，有效避免了由于下垂系数变化过大而导致的系统稳定性问题。

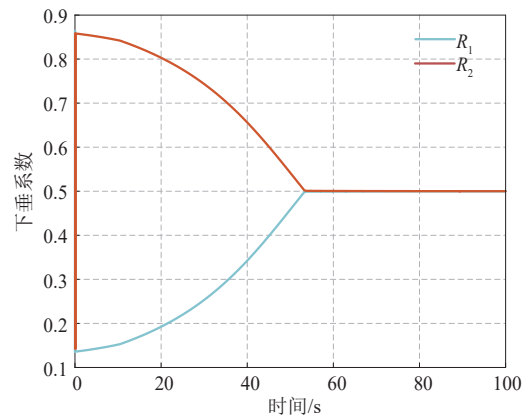
由上述分析可知，当采用优化后的变加速因子时，储能单元 SOC 均衡和输出电流收敛时间均比采用固定加速因子时大幅度缩短，且响应时间相差不大。因此，该组仿真对比说明采用本文所提的变加速因子能够提高不同储能单元之间的 SOC 均衡和输出电流收敛速度。采用优化前后的加速因子仿真结果对比如表 1 所示。



(a) 各储能单元的 SOC 值及其差值



(b) 各储能单元的输出电流



(c) 各储能单元的下垂系数

图 8 采用优化后变加速因子的仿真波形

Fig. 8 Simulated waveforms with optimized variable acceleration factor

表 1 采用优化前后的加速因子仿真结果对比

Tab. 1 Comparison of simulation results for acceleration factors before and after optimization

| 指标         | 固定加速因子 85 | 优化后变加速因子 |
|------------|-----------|----------|
| 响应时间/s     | 49.56     | 51.85    |
| SOC 均衡时间/s | >100.00   | 52.66    |
| 收敛时间/s     | >100.00   | 52.66    |

### 4.3 不同容量储能单元仿真效果

为使对比效果更加明显并排除偶然的可能性，同时验证所提策略对于不同容量储能模块同样适用，在 MATLAB/Simulink 中另外搭建包含 3 个储能单元的 DESS 仿真模型，其初始 SOC 分别为 55%、52% 和 50%，容量分别为 3、3、1.5 A·h，其他参数保持不变。图 9 为不同容量储能单元仿真波形。

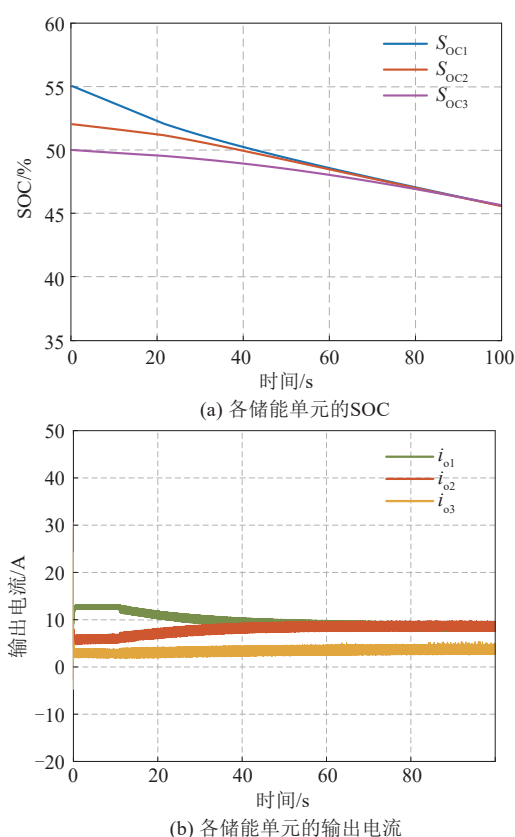


图9 不同容量储能单元仿真波形

Fig. 9 Simulated waveforms of energy storage units with different capacities

从图 9(a)可以看出，不同容量的储能单元 SOC 也可以快速趋于一致，说明所提控制策略在储能单元容量不同时仍适用，能使系统在较短时间内实现 SOC 均衡。从图 9(b)可以看出，加入虚拟电压补偿后，在未影响 SOC 均衡效果的基础上 3 个储能单元的输出电流满足 2:2:1，与容量比一致，即实现了电流的精准分配。

同时，由于加入了直流电压补偿项，当系统处于稳定时，直流母线电压基本无较大变化，说明当使用所提控制策略时直流母线基本不会产生

电压偏差量。因此，该组仿真实验可以证明本文所提控制策略在保证母线电压稳定的基础上实现了不同容量储能单元输出电流的精准分配。

## 5 结论

为解决直流微电网下 DESS 控制策略存在的问题，针对不同容量的储能单元提出了一种计及电池荷电状态的储能系统控制策略，得到以下结论：

1) 所提的改进型 SOC 下垂控制策略采用反正切嵌套幂函数的形式，将 SOC 差值与下垂系数结合起来，保证下垂系数在合理的范围内变化。同时，对下垂系数表达式中的变加速因子进行优化，使其能够保持在合理范围内，从而实现较好的均衡效果。

2) 在提出的改进下垂控制基础上加入虚拟电压和母线电压的补偿方案，能够消除虚拟阻抗引起的电流和电压偏差，实现电流的精准分配，并且保证母线电压在合理范围内。

3) 不同的仿真实验结果表明，所提控制策略在储能单元 SOC 均衡和电流精准分配方面具有优越性，且对不同容量储能单元具有适用性。

4) 所提控制策略以  $U-I$  下垂控制作为基础，适用于直流微电网下储能系统的控制。但是，该策略未考虑到除储能电池荷电状态以外的其他状态特征。因此，计及电池能量状态的储能系统控制策略将是未来研究的重点。

## 参考文献

- [1] 李文, 卜凡鹏, 张满桐, 等. 基于典型商业运营模式的含电-氢混合储能微电网系统优化运行方法[J]. 发电技术, 2024, 45(6): 1186-1200.  
LI W, BU F P, ZHANG X T, et al. Optimal operation method of electric-hydrogen hybrid energy storage microgrid system based on typical commercial operation mode[J]. Power Generation Technology, 2024, 45 (6): 1186-1200.
- [2] 谭玲玲, 汤伟, 楚冬青, 等. 考虑电-氢一体化的微电网低碳-经济协同优化调度[J]. 中国电力, 2024, 57(5): 137-148.  
TAN L L, TANG W, CHU D Q, et al. Low-carbon-economic collaborative optimal dispatching of microgrid

- considering electricity-hydrogen integration[J]. *Electric Power*, 2024, 57(5): 137-148.
- [3] 魏震波, 张芷琪, 李银江, 等. 多主体合作模式下微电网规划运行一体化模型[J]. *电力建设*, 2024, 45(10): 47-58.  
WEI Z B, ZHANG Z Q, LI Y J, et al. An integrated model of microgrid planning and operation under a multi-subject cooperation model[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(10): 47-58.
- [4] 于永进, 孙国强, 樊英杰. 基于动态事件触发机制的孤岛微电网频率控制方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(20): 60-71.  
YU Y J, SUN G Q, FAN Y J. A frequency control method for an islanded microgrid based on a dynamic event-triggered mechanism[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(20): 60-71.
- [5] 曾振松, 郑洁云, 魏鑫, 等. 微电网的氢-氨混合储能系统容量优化配置研究[J]. *广东电力*, 2024, 37(7): 42-49.  
ZENG Z S, ZHENG J Y, WEI X, et al. Research on capacity optimization configuration of hydrogen-ammonia hybrid storage system in microgrid[J]. *Guangdong Electric Power*, 2024, 37(7): 42-49.
- [6] 李书勇, 蔡海青, 沈娜, 等. 不同类型新能源接入对微电网频率的影响[J]. *分布式能源*, 2024, 9(2): 8-18.  
LI S Y, CAI H Q, SHEN N, et al. Impact of different types of new energy access on microgrid frequency[J]. *Distributed Energy*, 2024, 9(2): 8-18.
- [7] 魏新迟, 徐化博, 方陈, 等. 基于 $\mu$ PMU的孤岛微电网多源协调控制方法[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(3): 129-137.  
WEI X C, XU H B, FANG C, et al. Multi-source coordinated control method based on  $\mu$ PMU for islanded microgrid[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(3): 129-137.
- [8] 米阳, 陈鑫, 季亮, 等. 基于虚拟额定电流的直流微电网分布式储能单元精确电流分配研究[J]. *电网技术*, 2020, 44(3): 823-835.  
MI Y, CHEN X, JI L, et al. Accurate current sharing of distributed energy storage units in DC microgrid based on virtual rated current[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(3): 823-835.
- [9] 杨佳, 谢国栋, 张孟健, 等. 基于增强型麻雀搜索算法的孤岛微电网低碳调度[J]. *智慧电力*, 2024, 52(9): 96-103.  
YANG J, XIE G D, ZHANG M J, et al. Low-carbon scheduling of islanded microgrid using enhanced sparrow search algorithm[J]. *Smart Power*, 2024, 52(9): 96-103.
- [10] 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 Z R, SUN L Y. Balanced control strategy of distributed energy storage SOC considering line impedance[J]. *Electric Power*, 2024, 57(9): 238-246.
- [11] 李可然, 刘继春, 杨瑞琳, 等. 计及下垂曲线与储能的孤岛微电网分级调度策略[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(2): 223-230.  
LI K R, LIU J C, YANG R L, et al. Hierarchical dispatching strategy of islanded microgrid considering droop curve and energy storage[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(2): 223-230.
- [12] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(1): 1-18.  
LIU C, ZHUO J K, ZHAO D M, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(1): 1-18.
- [13] JIANG X S, CHEN K W, PAN J F. A comparative study of different equalizer for state of charge based droop control for distributed energy storage systems[C]// 2020 8th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA). Hong Kong: IEEE, 2020: 1-5.
- [14] 刘鑫蕊, 曹翰林, 蓝良生, 等. 考虑线路阻抗和储能容量的孤岛直流微电网自适应SOC均衡[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(1): 84-94.  
LIU X R, CAO H L, LAN L S, et al. Adaptive SOC equalization of an islanded DC microgrid considering line impedance and energy storage capacity[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(1): 84-94.
- [15] 丁凯, 钱一民, 陈乔, 等. 锂离子电池储能系统多时间尺度均衡方法[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(12): 3872-3882.  
DING K, QIAN Y M, CHEN Q, et al. Multitimescale equalization method for lithium-ion battery energy storage systems[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(12): 3872-3882.
- [16] 彭铖, 陈瑞珍, 王晓, 等. 基于阈值修正因子的锂电池动态均衡策略研究[J]. *电源技术*, 2023, 47(3): 320-324.  
PENG C, CHEN R Z, WANG X, et al. Research on dynamic balance strategy of lithium battery based on threshold correction factor[J]. *Chinese Journal of*

- Power Sources, 2023, 47(3): 320-324.
- [17] 吴青峰, 孙孝峰, 郝彦丛, 等. 微电网储能系统SOC平衡和电压频率恢复研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(6): 1743-1751.
- WU Q F, SUN X F, HAO Y C, et al. Research of soc balance and voltage frequency recovery of microgrid energy storage system[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2018, 39(6): 1743-1751.
- [18] LU X N, GUERRERO J M, SUN K, et al. An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1800-1812.
- [19] 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 P C, ZHANG C J, YUAN R R, 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.
- [20] 陈勃旭, 崔炜, 陈宇, 等. 分布储能直流微电网中多储能荷电均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 111-120.
- CHEN B X, CUI W, CHEN Y, et al. Charge balance control strategy for multiple energy storage in a distributed energy storage DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 111-120.
- [21] 张汀, 雷勇, 王小昔. 考虑SOC均衡的直流微网储能系统控制策略研究[J]. 电源技术, 2023, 47(8): 1099-1104.
- ZHANG T, LEI Y, WANG X X. Research on control strategy of DC microgrid energy storage system considering SOC equilibrium[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(8): 1099-1104.
- [22] LIU C, ZHAO J B, WANG S S, et al. Active identification method for line resistance in DC microgrid based on single pulse injection[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 5561-5564.
- [23] HOANG K D, LEE H H. Accurate power sharing with balanced battery state of charge in distributed DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 1883-1893.
- [24] DRAGIČEVIĆ T, LU X N, VASQUEZ J C, et al. DC microgrids: part I: a review of control strategies and stabilization techniques[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 4876-4891.
- [25] 雷基林, 余林兴, 别玉, 等. 孤岛微电网能量管理系统研究综述[J]. 发电技术, 2025, 46(2): 370-385.
- LEI J L, YU L X, BIE Y, et al. Review of energy management systems for islanded microgrids[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(2): 370-385.
- [26] 李秋良, 汤赐, 杨杰, 等. 基于改进下垂控制的直流微电网稳定性判据[J]. 南方电网技术, 2025, 19(7): 103-111.
- LI Q L, TANG C, YANG J, et al. Stability criterion of DC microgrid based on improved droop control[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(7): 103-111.
- [27] 李泽文, 毛紫玲, 王远川, 等. 基于改进一致性算法的孤岛微电网控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(3): 184-191.
- LI Z W, MAO Z L, WANG Y C, et al. Islanded microgrid control strategy based on improved consensus algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(3): 184-191.
- [28] YANG K, LI C H, JING X, et al. Energy dispatch optimization of islanded multi-microgrids based on symbiotic organisms search and improved multi-agent consensus algorithm[J]. Energy, 2022, 239: 122105.
- [29] 张丽霞, 姜彦涛, 沈开奎, 等. 对等控制模式下孤立微电网分布式经济优化控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(12): 155-162.
- ZHANG L X, LOU Y T, SHEN K K, et al. Distributed economic optimization control strategy for isolated microgrids under peer-to-peer control mode[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(12): 155-162.
- [30] GUAN Y J, MENG L X, LI C D, et al. A dynamic consensus algorithm to adjust virtual impedance loops for discharge rate balancing of AC microgrid energy storage units[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4847-4860.

收稿日期: 2025-06-09。

修回日期: 2025-09-01。

作者简介:



王明琦

王明琦(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为储能系统安全控制, 995833510@qq.com;



夏向阳

夏向阳(1968), 男, 博士, 教授, 研究方向为柔性直流输电控制和储能安全控制, 本文通信作者, 307351045@qq.com;



赵晓悦

赵晓悦(1993), 女, 博士研究生, 研究方向为储能电站安全监测、运行与控制等, 2363019161@qq.com;



黄如

黄如(1995), 男, 初级工程师, 研究方向为储能电站安全运行控制, 519690836@qq.com;



邓化龙

邓化龙(1973), 男, 高级工程师, 研究方向为储能安全检测与控制, 623544060@qq.com;



刘代飞

刘代飞(1977), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电、智能微电网与电力储能控制, dfcanfly@126.com;



蔡昱宽

蔡昱宽(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为配网运检及自动化方向, 6672502@qq.com。

(责任编辑 尚彩娟)