

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230516

## 分布储能直流微电网中多储能荷电均衡控制策略

陈勃旭, 崔炜, 陈宇, 李兴广, 吕品博

(长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 在分布式储能孤岛直流微电网系统中, 针对传统下垂控制策略无法实现荷电状态均衡、功率分配不精确和母线电压跌落的问题, 提出了一种自适应下垂控制策略。首先将双曲正切函数与荷电状态相结合, 利用双曲正切函数的特性, 限制下垂系数的范围并且快速进行调整。然后通过调节补偿量, 使下垂系数对应的电压相等, 设计了功率分配的补偿策略。最后计算线缆阻抗, 设计了二次母线电压补偿策略。Simulink 仿真实验结果表明, 所提控制策略可以实现荷电状态的均衡和功率的精确分配, 并且使母线电压能够准确维持在额定值。

**关键词:** 直流微电网; 储能控制; 荷电状态; 功率分配; 母线电压补偿

### Charge balance control strategy for multiple energy storage in a distributed energy storage DC microgrid

CHEN Boxu, CUI Wei, CHEN Yu, LI Xingguang, LÜ Pinbo

(School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** For a distributed energy storage island DC microgrid system, an adaptive sag control strategy is proposed to solve the problems whereby traditional sag control strategy cannot achieve the balance of charge state, the power distribution is not accurate and the bus voltage drops. First, by combining the hyperbolic tangent function with the charged state, the range of sag coefficient is limited and adjusted quickly through the characteristics of the hyperbolic tangent function. Then, by adjusting the compensation amount, the voltage corresponding to the sag coefficient is equal, and the compensation strategy of power distribution is designed. Finally, the cable impedance is calculated and a secondary bus voltage compensation strategy is designed. Simulink simulation results show that the proposed control strategy can achieve the balance of the charged state and the precise distribution of power, and the bus voltage can be maintained at the rated value accurately.

This work is supported by Jilin Science and Technology Development Project (No. 20220203066SF).

**Key words:** DC microgrid; energy storage control; state of charge; power distribution; bus voltage compensation

## 0 引言

光伏、风能等新能源发电可以有效缓解能源危机和环境污染, 往往在偏远地区来源丰富, 实现并网需要远距离铺设电缆, 经济效益低。微电网技术具有就地消纳的优势, 受到越来越多的关注<sup>[1-3]</sup>。孤岛直流微电网由于损耗低、效率高、运行灵活、控制简单等优点, 是未来分布式能源的发展趋势<sup>[4-7]</sup>。

直流微电网的结构如图1所示, 由光伏单元、风力发电机、分布式储能和负载组成<sup>[8]</sup>。为了保证孤岛直流微电网的电能质量和可靠运行, 需要通过储能系统来减小功率波动<sup>[9-10]</sup>, 从而维持微电网的功率平衡<sup>[11]</sup>。由于微电网自身的特点, 储能系统通常

由多个分布式储能单元(distributed energy storage units, DESU)并联在直流母线上构成。为了防止DESU过度充电或放电, 必须使DESU之间的荷电状态(state of charge, SOC)均衡<sup>[12-13]</sup>。一般采用 $I-V$ 下垂控制和 $P-V$ 下垂控制, 来实现DESU<sup>[14]</sup>之间的功率分配或电流分配。

但是, 每个采用传统下垂控制的DESU无法维持DESU之间的SOC均衡<sup>[15]</sup>。研究人员针对这一问题提出了许多修正下垂系数的方法。文献[16]提出的控制策略可以使DESU之间的SOC均衡, 但可能会引起直流母线电压产生较大波动。在文献[17]中, 每个DESU的下垂系数可以通过SOC的幂指数函数自适应调节, 然后实现功率共享。文献[18]设计了一种自适应电流调节算法, 提高系统荷电状态平衡速度、稳态和瞬态下的电流调节性能。文献

基金项目: 吉林省科技发展计划项目资助(20220203066SF)

[19]采用滑模控制方法对 DESU 的输出电压进行补偿,从而调节 DESU 的输出功率,达到 SOC 平衡。但是滑模控制的抖振问题可能会导致储能输出功率不断变化,从而影响 DESU 的使用寿命。

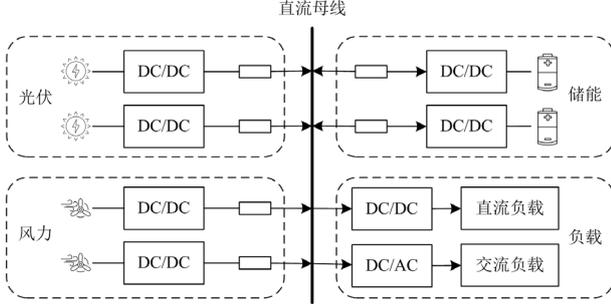


Fig. 1 DC microgrid structure

基于上述 SOC 平衡方法,由于直流微电网中存在大小不同的线路电阻,所以无法保证 DESU 之间精确的电流或功率分配。为了解决这一问题,文献[20]提出了具有较大下垂系数的下垂控制,但是这种方法不能完全消除线路电阻的影响,并且会导致母线电压产生较大的电压偏差,从而影响系统的稳定性。文献[21]提出了基于一致性算法的下垂控制策略,该策略通过获取邻近变换器信息的方式,减少了通信量,实现了无功功率的精确分配。然而这种方法并未考虑控制参数对系统稳定性的影响。另一方面,由于线缆阻抗的存在,母线电压会出现偏差。为了解决这一问题,文献[22]将各 DESU 的输出电压取平均值,再与母线电压参考值比较,从而进行补偿。但是随着 DESU 输出功率的提高,母线电压的偏差会被放大,仍然存在很大的缺陷。

本文首先讲解了传统  $I-V$  下垂控制的不足之处,然后在此基础上,针对孤岛直流微电网的 DESU 控制策略,从 SOC 快速均衡、功率精确分配和母线电压恢复 3 个方面考虑,提出了一种自适应下垂控制策略。该策略通过引入双曲正切函数,不断对下垂系数进行调整,提高了 SOC 均衡的速度和精度。通过调节补偿量,使下垂系数对应的电压相等,提高功率分配精度。计算线缆阻抗,设计了二次母线电压补偿控制策略,保证直流母线电压稳定在额定值附近。通过 Simulink 仿真进一步验证了所提控制策略的可靠性和正确性。

## 1 孤岛直流微电网中传统下垂控制的分析

### 1.1 SOC 估算方法

为了准确获取 DESU 的带电状态,选择库仑计

数方法<sup>[23]</sup>作为估算 SOC 的主要手段,具体表示为

$$S_i = S_{o\_i} - \frac{\eta}{c_i} \int I_{dc i} dt \quad (1)$$

式中:  $S_i$  为当前时刻第  $i$  个蓄电池的荷电状态;  $S_{o\_i}$  为第  $i$  个蓄电池初始荷电状态;  $\eta$  为逆变器输出电压与输入电压之比;  $c_i$  为第  $i$  个蓄电池的储能容量;  $I_{dc i}$  为第  $i$  个 DESU 的输出电流。

忽视变换器的损耗  $S_i$  可以表示为

$$S_i = S_{o\_i} - \frac{\eta}{c_i} \int \frac{P_i}{V_{dc i}} dt \quad (2)$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  个 DESU 的充放电功率;  $V_{dc i}$  为第  $i$  个 DESU 的输出电压。

### 1.2 传统下垂控制

在直流微电网储能系统中,通常采用  $I-V$  下垂控制对各 DESU 进行功率分配,其表达式<sup>[24]</sup>为

$$V_{dc i} = V_{bus}^* - R_{droop\_i} I_{dc i} \quad (3)$$

式中:  $V_{bus}^*$  为母线额定电压;  $R_{droop\_i}$  为第  $i$  个变换器的下垂系数。

下面以两个容量相等的 DESU 并联为例,进一步讨论传统下垂控制,如图 2 所示。其中:  $R_{line\_1}$  和  $R_{line\_2}$  为 DESU1 和 DESU2 的线缆阻抗;  $R_{load}$  为负载等效电阻;  $I_{dc1}$  和  $I_{dc2}$  分别为变换器 1 和变换器 2 的输出电流;  $V_{dc1}^*$  和  $V_{dc2}^*$  分别为变换器 1 和变换器 2 输出电压参考值,并且差值较小,与  $V_{bus}^*$  相近;  $V_{dc1}$  和  $V_{dc2}$  分别为变换器 1 和变换器 2 的输出电压。通过调整下垂系数  $R_{droop}$  的大小,实现各 DESU 的功率分配。

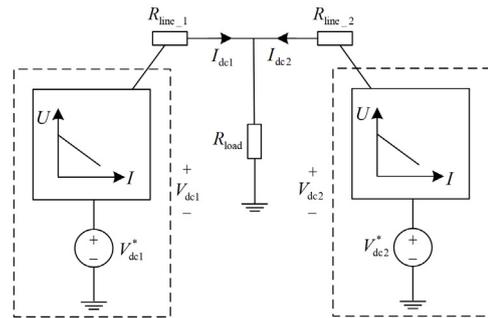


图 2 双储能单元并联电路模型

Fig. 2 Parallel circuit model of double DESUs

然而,传统下垂控制的下垂系数固定,只能按照固定值分配功率,所以无法自适应调整下垂系数,也就无法维持 DESUs 的 SOC 均衡。此外,由于线缆阻抗的存在,输出功率不能根据下垂系数准确分配,并且母线电压会偏离参考值,这是传统下垂控制的一对矛盾。

## 2 SOC 均衡策略与功率精确分配策略

### 2.1 SOC 均衡策略

在实际应用中, 由于负载类型和控制精度的不同, 各 DESU 的初始 SOC 一般并不相同。然而, 传统的  $I-V$  下垂控制, 由于无法结合 SOC 信息, 导致各 DESU “过充过放”。为了使 DESU 更快地达到 SOC 均衡, 提出了一种利用双曲正切函数的特性, 将下垂系数限制在一定范围内, 实现 SOC 快速均衡的控制策略。

当 DESU 放电时, 下垂系数设计为

$$R_{\text{droop}_i} = R_0 + k_i \tanh(N \cdot \Delta S) \quad (4)$$

$$k_i = \begin{cases} \frac{c_{\text{avg}}}{c_i} (R_{\text{max}} - R_0), \Delta S \geq 0 \\ \frac{c_i}{c_{\text{avg}}} (R_0 - R_{\text{min}}), \Delta S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$S_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (6)$$

$$\Delta S_i = S_{\text{avg}} - S_i \quad (7)$$

$$N = a |\Delta S| + b \quad (8)$$

式中:  $R_0$  为初始下垂系数;  $k_i$  为第  $i$  个 DESU 的修正系数, 配合初始下垂系数对变化值进行调整;  $R_{\text{max}}$  和  $R_{\text{min}}$  分别为下垂系数的最大、最小值;  $c_i$  为第  $i$  个 DESU 的容量;  $c_{\text{avg}}$  为平均容量;  $S_{\text{avg}}$  为 DESUs 的平均 SOC;  $n$  为 DESU 数量;  $\Delta S_i$  为平均 SOC 值与第  $i$  个 DESU 的 SOC 差值; 由于 DESU 荷电状态变化范围在 0~1 之间, 数值很小且变化缓慢, 为了放大不同 DESU 荷电状态的差异, 引入了放大因子  $N$ ;  $a$ 、 $b$  为加速因子。

当 DESU 充电时, 修正系数设计为

$$k_i = \begin{cases} \frac{c_i}{c_{\text{avg}}} (R_0 - R_{\text{min}}), \Delta S > 0 \\ \frac{c_{\text{avg}}}{c_i} (R_{\text{max}} - R_0), \Delta S \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$R_{\text{max}}$  和  $R_{\text{min}}$  可以在下垂系数范围的基础上, 根据稳定性适当调整。利用  $c_i$  和  $c_{\text{avg}}$  配合下垂系数范围对下垂系数的变化量进行调整, 随着迭代次数的增加, 下垂系数逐渐趋于初始下垂系数  $R_0$ ,  $\Delta S_i$  趋于 0, 实现各 DESU 的 SOC 均衡。

### 2.2 功率精确分配策略

在实际应用中, 孤岛直流微电网中必然存在线缆阻抗, 所以 SOC 的均衡会受到影响, 而  $I-V$  下垂控制则可以重新表示为

$$V_{\text{dci}}^* = V_{\text{bus}}^* - R_{\text{droop}_i} I_{\text{dci}} - R_{\text{line}_i} I_{\text{dci}} \quad (10)$$

由于存在线缆阻抗, 可以得出

$$\frac{R_{\text{droop}_i} + R_{\text{line}_i}}{R_{\text{droop}_j} + R_{\text{line}_j}} \neq \frac{R_{\text{droop}_i}}{R_{\text{droop}_j}} \quad (11)$$

式中,  $R_{\text{line}_i}$ 、 $R_{\text{line}_j}$  分别为 DESU <sub>$i$</sub>  和 DESU <sub>$j$</sub>  的线缆阻抗。

所以受线缆阻抗的影响, 无法得到准确的功率分配。为了消除线缆阻抗的影响, 需要使下垂系数对应的电压相等, 实现输出功率的精确分配。如式(12)所示。

$$R_{\text{droop}_i} I_{\text{dci}} = R_{\text{droop}_j} I_{\text{dcj}} \quad (12)$$

但是直接采用上述方法会引起输出功率大幅度波动, 并且影响各 DESU 的 SOC 均衡, 所以考虑利用一个系数  $m$  对补偿量进行调节, 减小未均衡前的影响, 提高均衡时的精度。如式(13)所示。

$$m \cdot R_{\text{droop}_i} I_{\text{dci}} = m \cdot R_{\text{droop}_j} I_{\text{dcj}} \quad (13)$$

$m$  的取值根据输出功率的波动进行调整, 取值过大会增大输出功率的波动, 可以得出调节电压  $V_{u_i}$  和平均调节电压  $\bar{V}_u$  分别为

$$V_{u_i} = m \cdot R_{\text{droop}_i} I_{\text{dci}} \quad (14)$$

$$\bar{V}_u = \frac{V_{u_1} + V_{u_2} + \dots + V_{u_n}}{n} \quad (15)$$

最后实现各 DESU 调节电压与平均调节电压相等, 如式(16)所示, 就可以实现下垂系数对应电压相等, 解决输出功率  $P_i$  分配精确度低的问题。

$$V_{u_i} = V_{u_j} = \dots = \bar{V}_u \quad (16)$$

通过 PI 控制进行补偿, 具体补偿  $\Delta V_i$  如式(17)所示。

$$\Delta V_i = (k_{p_m} + \frac{k_{i_m}}{s})(\bar{V}_u - V_{u_i}) \quad (17)$$

式中:  $k_{p_m}$  为比例系数;  $k_{i_m}$  为积分系数。

### 2.3 母线电压补偿策略

在实际应用中, 必然存在线缆阻抗, 因此母线电压会低于额定值。本文将线缆阻抗两端电压引入母线参考电压中, 由于线缆阻抗不容易直接测量, 所以线缆阻抗两端电压  $V_{\text{line}_i}$  计算为

$$V_{\text{line}_i} = V_{\text{dci}} - V_{\text{bus}} \quad (18)$$

通过 PI 控制进行补偿,  $k_{p_n}$  为比例系数,  $k_{i_n}$  为积分系数, 具体  $\Delta V_v$  补偿表达式为

$$\Delta V_v = (k_{p_n} + \frac{k_{i_n}}{s})(V_{\text{line}_i} + V_{\text{bus}}^* - V_{\text{dci}}) \quad (19)$$

通过设计的 SOC 均衡控制策略、功率精确分配策略  $\Delta V_i$  和母线电压补偿策略  $\Delta V_v$ , 解决了 SOC 不均衡的问题, 实现 DESU 输出功率的精确分配和母

线电压的恢复。整体控制框图如图 3 所示, 本文所提出的自适应下垂控制如式(20)所示。

$$V_{dci} = V_{bus}^* + \Delta V_v + \Delta V_i - R_{droop} I_{dci} \quad (20)$$

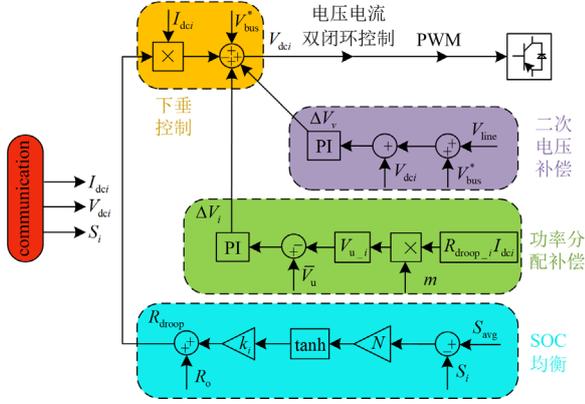


图 3 整体控制框图

Fig. 3 Overall control block diagram

### 3 稳定性分析

为了对本文所提控制策略的直流微电网稳定性进行分析, 以两组并联的 DESU<sub>i</sub> 和 DESU<sub>j</sub> 为例, 系统稳定性的模型<sup>[25]</sup>如图 4 所示。

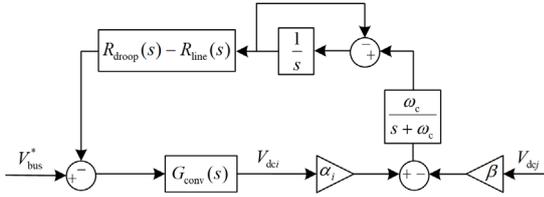


图 4 系统稳定性模型

Fig. 4 System stability model

根据图 4 可以得到输出电压, 如式(21)所示。

$$\begin{cases} V_{dci}(s) = V_{bus}^* - \frac{\omega_c (R_{droop} - R_{line\_i})}{(s+1)(s+\omega_c)} (\alpha_i V_{dci} - \beta V_{dcj}) \\ V_{dcj}(s) = V_{bus}^* - \frac{\omega_c (R_{droop} - R_{line\_j})}{(s+1)(s+\omega_c)} (\alpha_j V_{dcj} - \beta V_{dci}) \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $\omega_c$  为低通滤波截止频率;  $\alpha_i$ 、 $\alpha_j$  和  $\beta$  表示如式(22)所示。

$$\begin{cases} \alpha_i = \frac{R_{line\_j} + R_{load}}{R_{line\_i} R_{line\_j} + R_{line\_i} R_{load} + R_{line\_j} R_{load}} \\ \alpha_j = \frac{R_{line\_i} + R_{load}}{R_{line\_i} R_{line\_j} + R_{line\_i} R_{load} + R_{line\_j} R_{load}} \\ \beta = \frac{R_{load}}{R_{line\_i} R_{line\_j} + R_{line\_i} R_{load} + R_{line\_j} R_{load}} \end{cases} \quad (22)$$

结合式(20)一式(22), 可得到系统特征方程如式(23)所示。

$$As^4 + Bs^3 + Cs^2 + Ds + E = 0 \quad (23)$$

$$\begin{cases} A = 1 \\ B = 2 + 2\omega_c \\ C = 1 + 4\omega_c + \omega_c^2 + \omega_c R_{droop} (\alpha_i + \alpha_j) - \omega_c (R_{line\_i} \alpha_i + R_{line\_j} \alpha_j) \\ D = 2\omega_c + 2\omega_c^2 + \omega_c (1 + \omega_c) R_{droop} (\alpha_i + \alpha_j) - \omega_c (1 + \omega_c) (R_{line\_i} \alpha_i + R_{line\_j} \alpha_j) \\ E = \omega_c^2 + \omega_c^2 R_{droop} (\alpha_i + \alpha_j) + \omega_c^2 R_{droop}^2 (\alpha_i \alpha_j - \beta^2) - \omega_c^2 (R_{line\_i} \alpha_i + R_{line\_j} \alpha_j) + \omega_c^2 (R_{line\_i} R_{line\_j} - R_{droop} R_{line\_i} - R_{droop} R_{line\_j}) (\alpha_i \alpha_j - \beta^2) \end{cases} \quad (24)$$

表 1 稳定性分析的参数配置

Table 1 Parameter configuration for stability analysis

参数	数值
DESU <sub>i</sub> 线缆阻抗/ $\Omega$	0.1
DESU <sub>j</sub> 线缆阻抗/ $\Omega$	0.2
负载阻值/ $\Omega$	12
DESU 容量/Ah	0.25
下垂系数	0.01~1
截止频率/(rad/s)	10~50
额定电压/V	400

将表 1 参数代入特征方程, 绘制不同参数变化的根轨迹, 进而判断稳定性。图 5 为下垂系数从 0.01 增加到 1, 截止频率  $\omega_c$  保持在 10 rad/s 时的根轨迹。当下垂系数逐渐增大时, 全部根分布在左半平面, 根据根轨迹法与根轨迹图可以得出, 系统稳定。图 6 为截止频率  $\omega_c$  从 10 rad/s 增加到 50 rad/s, 下垂系数保持在 0.1 时的根轨迹, 全部根分布在左半平面, 同样可以得出系统稳定。

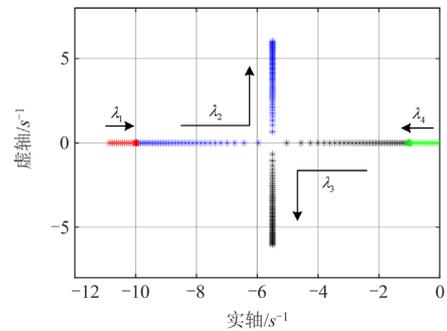
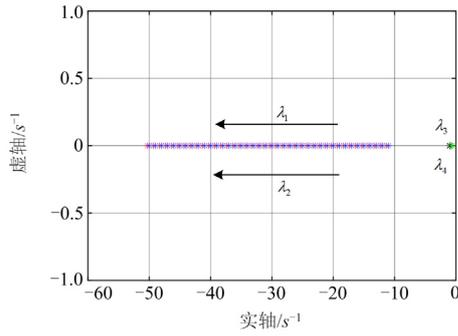


图 5  $\omega_c$  不变,  $R_{droop}$  增加的根轨迹图

Fig. 5 Root locus while  $\omega_c$  is invariant and  $R_{droop}$  increases

图 6  $R_{\text{droop}}$  不变,  $\omega_c$  增加的根轨迹图Fig. 6 Root locus while  $R_{\text{droop}}$  is invariant and  $\omega_c$  increases

#### 4 算例分析

针对孤岛直流微电网的分布式储能单元, 本文利用 Matlab/Simulink 建立了包含 3 个相同容量的 DESU、1 个光伏单元和 1 个负载构成的孤岛直流微电网模型。在多种情况下, 将所提自适应控制策略与传统下垂控制策略、文献[26]所提控制策略进行对比。具体仿真参数如表 2 所示。

表 2 仿真的参数配置

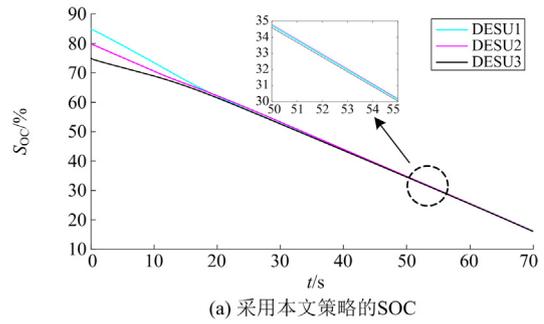
Table 2 Parameter configuration for simulation

参数	数值
DESU <sub>i</sub> 线缆阻抗/ $\Omega$	0.1
DESU <sub>j</sub> 线缆阻抗/ $\Omega$	0.2
DESU <sub>k</sub> 线缆阻抗/ $\Omega$	0.3
负载功率/kW	13
额定电压/V	400
光伏额定功率/kW	3.5
初始下垂系数	0.05
DESU 容量/Ah	0.25

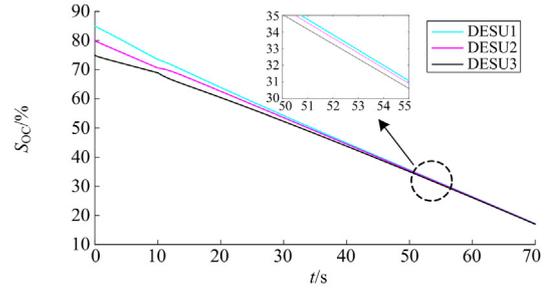
##### 4.1 算例 1: DESU 正常放电

在 DESU 正常放电的情况下, 将本文所提的控制策略与文献[26]所提的控制策略进行对比, 仿真结果如图 7 所示。实验结果对比如表 3 所示, 其中计算了 SOC 均衡并稳定时各 SOC 与平均 SOC 的最大偏差; 计算了输出功率分配稳定时各输出功率与平均输出功率的最大偏差; 计算了母线电压稳定时与参考母线电压的最大偏差。在本算例中, 在 0~10 s 内采用传统下垂控制, 在 10 s 后切换为改进后的下垂控制。

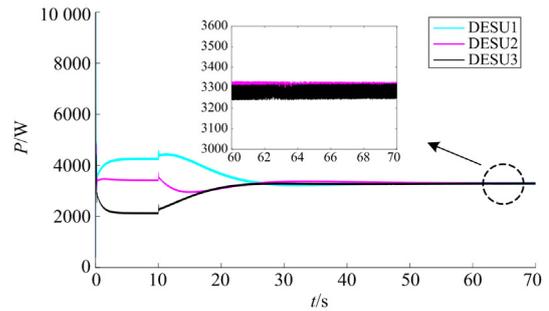
如图 7(a)、图 7(b)所示, 各 DESU 初始 SOC 分别为 85%、80%、75%。在 0~10 s 内, 从图 7(b)、图 7(c)中可以看出, 各 DESU 输出功率已经固定, 由于传统下垂控制不能自适应改变下垂系数, 所以无法调节输出功率, 也就无法维持 SOC 均衡。在 10 s 后切换为改进后的下垂控制, 对比图 7(a)、图 7(b)可以发现, 图 7(a)的 SOC 均衡效果和均衡速度



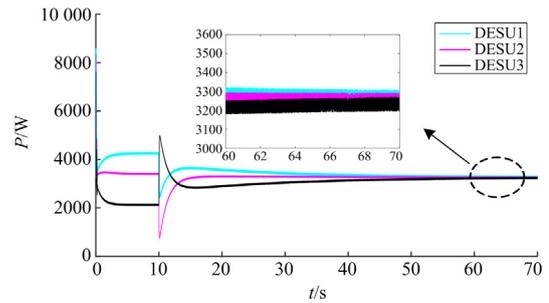
(a) 采用本文策略的 SOC



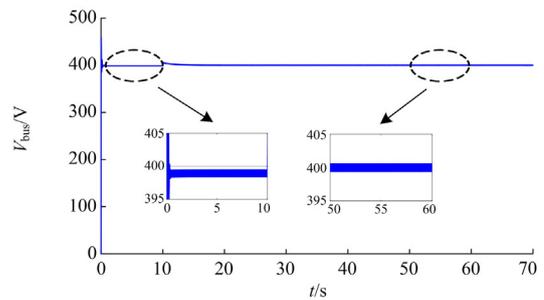
(b) 采用文献[26]策略的 SOC



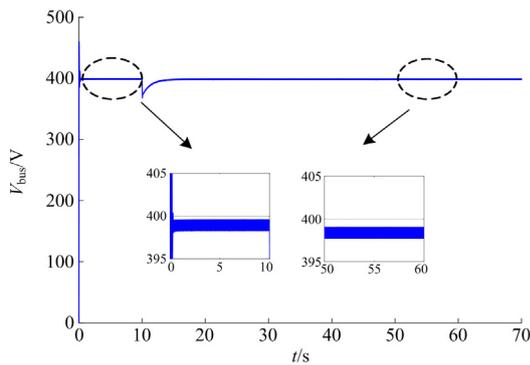
(c) 采用本文策略的输出功率



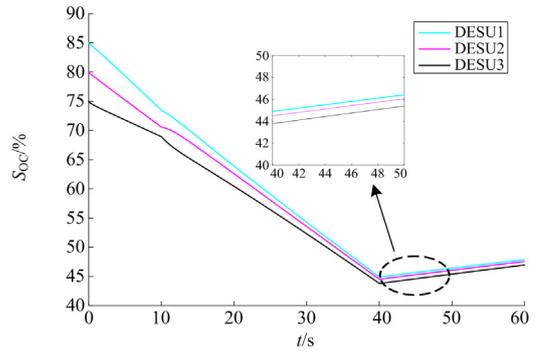
(d) 采用文献[26]策略的输出功率



(e) 采用本文策略的母线电压



(f) 采用文献[26]策略的母线电压



(b) 采用文献[26]策略的SOC

图7 算例1 仿真结果

Fig. 7 Simulation results of example 1

表3 正常情况下实验结果对比分析

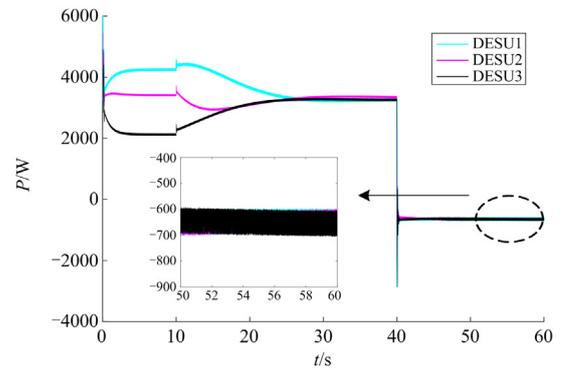
Table 3 Comparative analysis of experimental results under normal condition

策略	SOC 偏差/%	功率偏差/%	电压偏差/%
本文策略	0.34	0.21	0
文献[26]策略	0.92	0.83	0.40

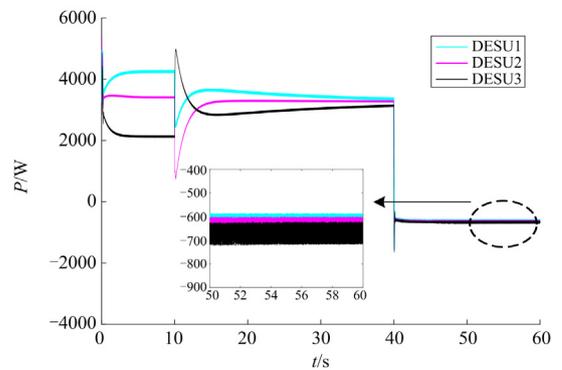
都较为优秀。在 10 s 后，对比图 7(c)、图 7(d)可以发现，在切换控制策略后，图 7(c)的输出功率更为稳定，且功率分配的精度更高。如图 7(e)、图 7(f)所示，母线电压的参考值为 400 V，在 0~10 s 内，由于下垂系数和线缆阻抗的存在，导致母线电压偏离参考值。在 10 s 后，对比图 7(e)、图 7(f)可以发现，图 7(e)的母线电压补偿更有效。

#### 4.2 算例 2：负载突变

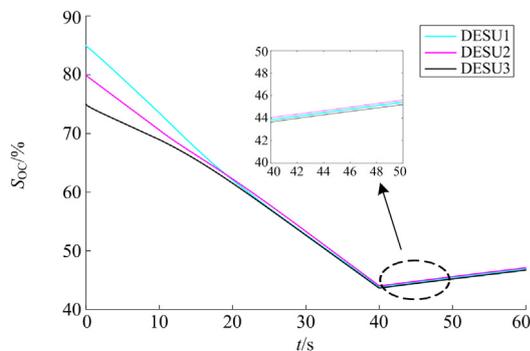
在负载突变的情况下，将本文所提出的控制策略与文献[26]所提的控制策略进行对比，仿真结果如图 8 所示，实验结果对比如表 4 所示。在本算例中，在 0~10 s 内采用传统下垂控制，在 10 s 后切换为改进后的下垂控制，在 40 s 时负载消耗功率由 13 kW 减小为 1.6 kW，由光伏单元供电，各 DESU 由放电状态切换到充电状态。



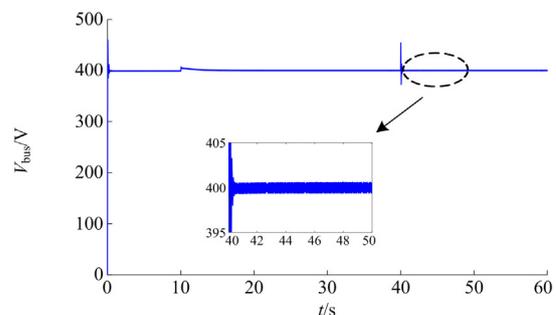
(c) 采用本文策略的输出功率



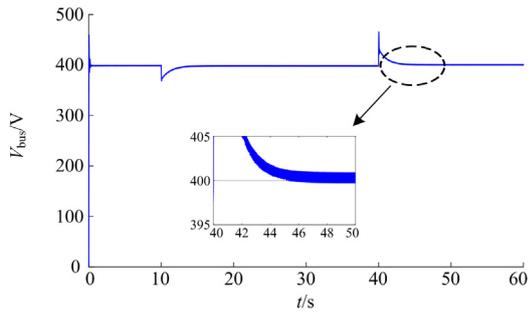
(d) 采用文献[26]策略的输出功率



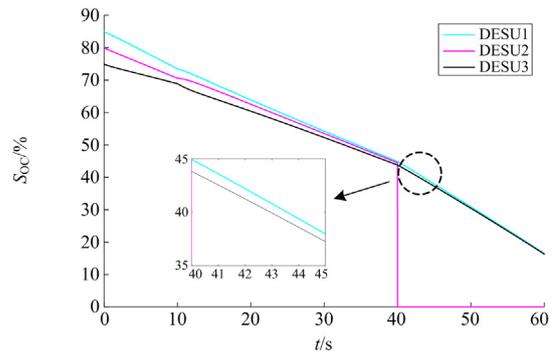
(a) 采用本文策略的SOC



(e) 采用本文策略的母线电压



(f) 采用文献[22]策略的母线电压



(b) 采用文献[26]策略的SOC

图8 算例2 仿真结果

Fig. 8 Simulation results of example 2

表4 负载突变情况下实验结果对比分析

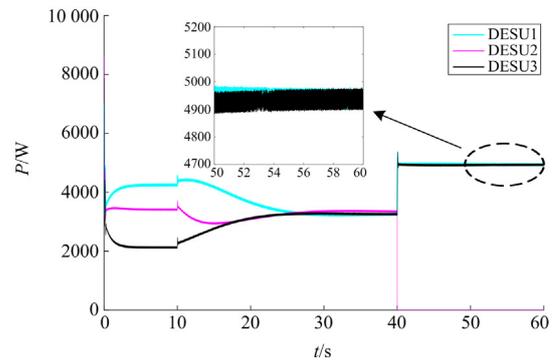
Table 4 Comparative analysis of experimental results

under load mutation			
策略	SOC 偏差/%	功率偏差/%	电压偏差/%
本文策略	0.44	0.09	0
文献[26]策略	1.30	0.41	0.10

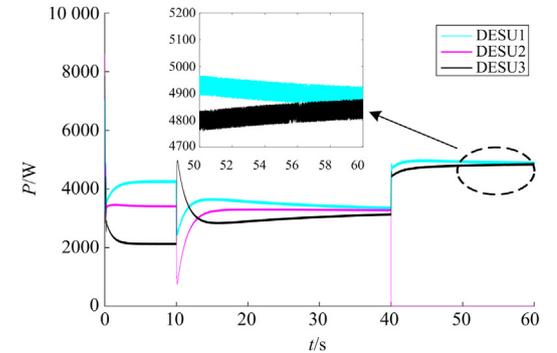
对比图 8(a)、图 8(b)可以发现, 图 8(b)在负载突变后均衡效果降低, 无法进一步地实现 SOC 均衡, 而图 8(a)则能快速达到 SOC 均衡, 并且在负载突变的情况下仍然具有较好的 SOC 均衡效果。对比图 8(c)、图 8(d)可以发现, 在切换控制策略后, 图 8(c)的输出功率更为稳定, 且功率分配的精度更高。对比图 8(e)、图 8(f)可以发现, 图 8(e)的母线电压能够在系统波动后快速恢复至额定值。

### 4.3 算例3: 储能故障

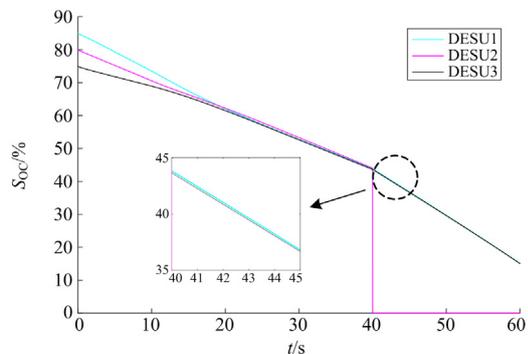
在算例3 储能故障的情况下, 将本文所提出的控制策略与文献[26]所提的控制策略进行对比, 仿真结果如图 9 所示, 实验结果对比如表 5 所示。在本算例中, 0~10 s 采用传统下垂控制, 10 s 后切换为改进后的下垂控制, 40 s 时初始 SOC 为 80%的 DESU 退出系统。



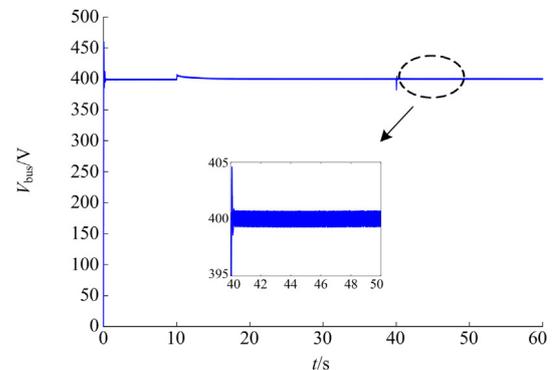
(c) 采用本文策略的输出功率



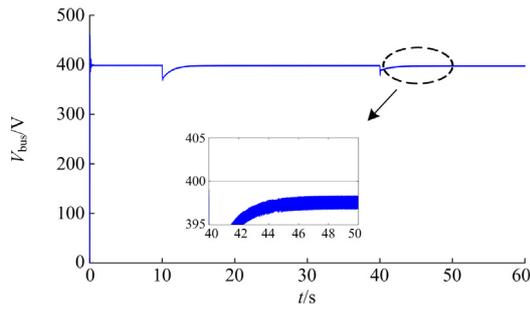
(d) 采用文献[26]策略的输出功率



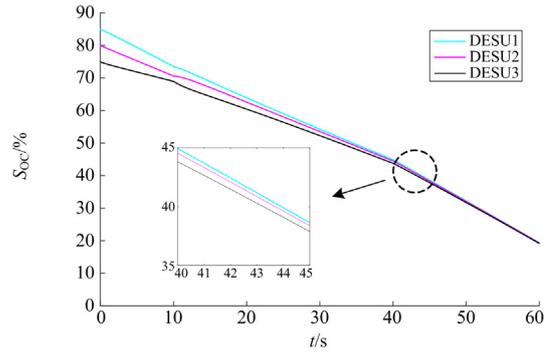
(a) 采用本文策略的SOC



(e) 采用本文策略的母线电压



(f) 采用文献[26]策略的母线电压



(b) 采用文献[26]策略的SOC

图9 算例3 仿真结果

Fig. 9 Simulation results of example 3

表5 储能故障情况下实验结果对比分析

Table 5 Comparative analysis of experimental results under energy storage fault

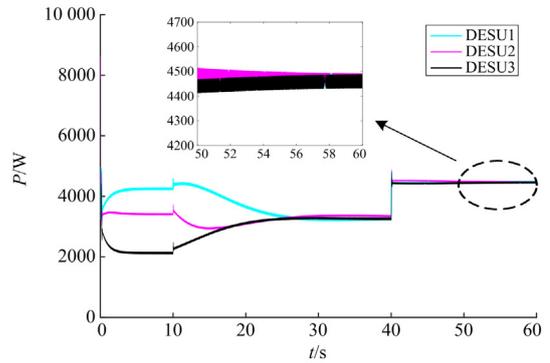
策略	SOC 偏差/%	功率偏差/%	电压偏差/%
本文策略	0.18	0.02	0
文献[26]策略	0.91	0.58	0.65

对比图 9(a)、图 9(b)可以发现, 在 DESU 退出运行后图 9(a)仍然能实现 SOC 均衡。如图 9(c)、图 9(d)所示, 在部分 DESU 退出运行后, 剩余 DESU 加大输出功率, 图 9(c)更能准确分配输出功率。如图 9(e)、图 9(f)所示, 由于 DESU 故障, 母线电压产生波动, 但从图 9(e)可以看出, 采用本文所提策略, 系统母线电压基本能一直保持在额定值附近。

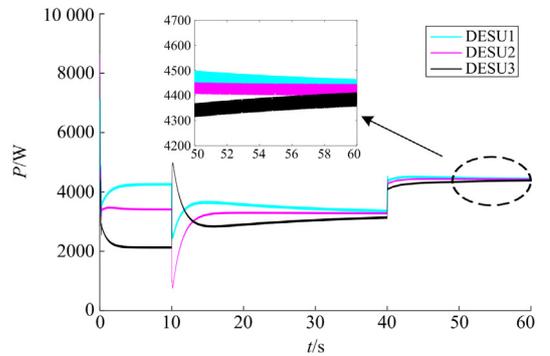
#### 4.4 算例 4: 光伏故障

在算例 4 光伏故障的情况下, 将本文所提出的控制策略与文献[26]中所提的控制策略进行对比, 仿真结果如图 10 所示, 实验结果对比如表 6 所示。在本算例中, 0~10s 内采用传统下垂控制, 10s 后切换为改进后的下垂控制, 40s 时光伏单元退出系统。

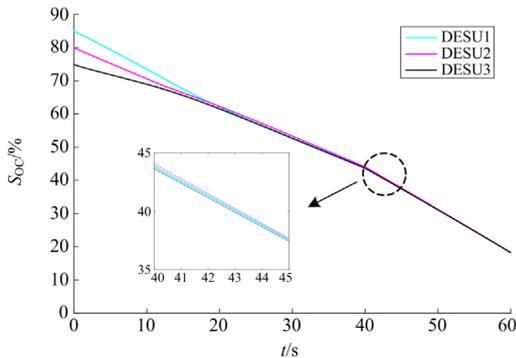
将图 10(a)、图 10(b)进行比较, 可以发现在光伏单元退出系统后, 图 10(a)的 SOC 均衡效果和速度更好。将图 10(c)、图 10(d)进行比较, 可以发现图 10(c)功率分配的精度更高。如图 10(e)、图 10(f)



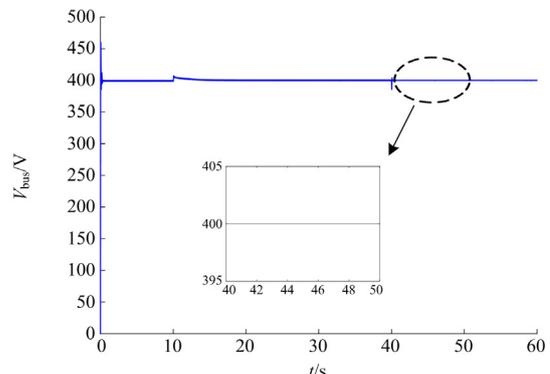
(c) 采用本文策略的输出功率



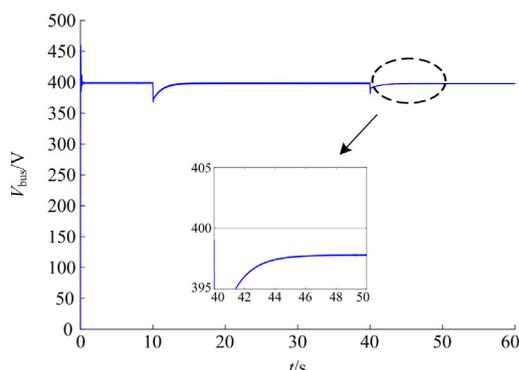
(d) 采用文献[26]策略的输出功率



(a) 采用本文策略的SOC



(e) 采用本文策略的母线电压



(f) 采用文献[26]策略的母线电压

图 10 算例 4 仿真结果

Fig. 10 Simulation results of example 4

表 6 光伏故障情况下实验结果对比分析

Table 6 Comparative analysis of experimental results under PV fault

策略	SOC 偏差/%	功率偏差/%	电压偏差/%
本文策略	0.37	0.10	0
文献[26]策略	1.08	0.75	0.55

所示, 在光伏单元退出运行后, 母线电压的波动范围明显减小。从图 10(e)可以看出, 在光伏故障的情况下, 母线电压补偿效果仍然更好。

## 5 结论

针对传统下垂控制无法实现分布式储能 SOC 均衡、功率分配不精确、母线电压出现偏差的问题, 提出了一种自适应下垂控制策略, 得出以下结论。

1) 该策略引入双曲正切函数, 通过荷电状态实现下垂系数的自适应调节, 利用双曲正切函数的特性和修正系数的调整, 将下垂系数限制在一定范围内, 实现 SOC 快速均衡。

2) 在功率分配精度方面, 通过调节补偿量, 使下垂系数对应的电压相等, 提高功率分配精度。

3) 考虑线缆阻抗两端电压, 设计母线电压的二次补偿策略, 使母线电压始终准确维持在额定值。

最后, Simulink 仿真实验结果表明, 所提控制策略可以实现荷电状态的均衡和功率的精确分配, 并且使母线电压能够准确维持在额定值。

## 参考文献

[1] WANG H, HOU Y, YU H. Analysis of integrated energy-load characteristics based on sparse clustering and compressed sensing[J]. IET Energy Systems Integration, 2019, 1(3): 194-201.

[2] 李靖, 王志和, 倪浩. 基于改进下垂控制的直流微网运行研究[J]. 发电技术, 2021, 42(6): 765-774.

LI Jing, WANG Zhihe, NI Hao. Research on DC microgrid operation based on improved droop control[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(6): 765-774.

[3] 李冰, 李岚, 王浩, 等. 一种改善直流微电网负荷电流分配的下垂控制[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 48-54.

LI Bing, LI Lan, WANG Hao, et al. An improved droop control of load current sharing in DC microgrid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 48-54.

[4] 曾浩, 赵恩盛, 周思宇, 等. 基于电流一致性的直流微电网自适应下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 12-21.

ZENG Hao, ZHAO Ensheng, ZHOU Siyu, et al. Adaptive droop control of a DC microgrid based on current consistency[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 12-21.

[5] MORTEZAPOUR V, GOLSHANNAVAZ S, POURESMAEIL E, et al. A new hybrid control technique for operation of DC microgrid under islanded operating mode[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 646-656.

[6] 陈龙超, 范宏, 郭翔, 等. 含 EV 充电站的园区微电网孤岛运行可靠性评估[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(4): 100-108.

CHEN Longchao, FAN Hong, GUO Xiang, et al. Reliability evaluation of park microgrid with EV charging station running in islanding state[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4): 100-108.

[7] 吴强, 韩俊, 金颀, 等. 冷热电联供型孤岛微电网环保经济调度模型[J]. 中国电力, 2021, 54(12): 137-142.

WU Qiang, HAN Jun, JIN Ting, et al. Environmental and economic dispatch model for island microgrid of combined cooling, heating and power[J]. Electric Power, 2021, 54(12): 137-142.

[8] 丁雨, 于艾清, 高纯. 基于改进一致性算法的独立光储直流微电网电压稳定能量协调策略[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 74-79.

DING Yu, YU Aiqing, GAO Chun. An energy coordination strategy for island DC microgrid with photovoltaic and storage system based on improved consensus algorithm[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 74-79.

[9] 詹红霞, 肖竣文, 邓小勇, 等. 计及柔性负荷的高比例风光渗透下配电网孤岛划分策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 108-116.

ZHAN Hongxia, XIAO Junwen, DENG Xiaoyong, et al. Islanding strategy for distribution network with high proportion of wind/photovoltaic penetration considering flexible load[J]. Electric Power Engineering Technology,

- 2022, 41(4): 108-116.
- [10] 马锐, 李相俊, 李文启, 等. 可再生能源供电区域电网中储能系统协同调度策略[J]. 发电技术, 2021, 42(1): 31-39.  
MA Rui, LI Xiangjun, LI Wenqi, et al. Cooperative scheduling strategy of energy storage systems for regional grid supplied by renewable energy[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 31-39.
- [11] TRINH P H, CHUNG I Y. Optimal control strategy for distributed energy resources in a DC microgrid for energy cost reduction and voltage regulation[J]. Energies, 2021, 14(4): 992.
- [12] 陈景文, 刘嘉欣, 张文倩. 基于一致性算法的直流微网多储能 SoC 均衡策略[J]. 智慧电力, 2022, 50(9): 30-38.  
CHEN Jingwen, LIU Jiaxin, ZHANG Wenqian. State of charge equalization strategy of multi-energy storage in DC microgrid based on consensus algorithm[J]. Smart Power, 2022, 50(9): 30-38.
- [13] 王波, 张占营, 张霄, 等. 直流微电网分布式储能系统精确电流分配策略[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 96-103, 112.  
WANG Bo, ZHANG Zhanying, ZHANG Xiao, et al. Accurate current sharing strategy for distributed energy storage system in DC microgrids[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 96-103, 112.
- [14] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 72-84.  
ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 72-84.
- [15] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 72-84.  
ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 72-84.
- [16] XU D, ZHANG W, JIANG B, et al. Directed-graph-observer-based model-free cooperative sliding mode control for distributed energy storage systems in DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 16(2): 1224-1235.
- [17] 张良, 闫凯宏, 冷祥彪, 等. 基于 SOC 下垂控制的独立直流微电网协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 87-97.  
ZHANG Liang, YAN Kaihong, LENG Xiangbiao, et al. Research on coordinated control strategy of an autonomous DC microgrid based on SOC droop control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 87-97.
- [18] MI Y, DENG J, YANG X, et al. The novel multiagent distributed SOC balancing strategy for energy storage system in DC microgrid without droop control[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 146: 108716.
- [19] MORSTYN T, SAVKIN A V, HREDZAK B, et al. Multi-agent sliding mode control for state of charge balancing between battery energy storage systems distributed in a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(5): 4735-4743.
- [20] GUO F, XU Q, WEN C, et al. Distributed secondary control for power allocation and voltage restoration in islanded DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1857-1869.
- [21] 张莹, 孟润泉, 王子昂, 等. 一种基于一致性算法的改进下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 104-111.  
ZHANG Ying, MENG Runquan, WANG Ziang, et al. An improved droop control strategy based on a consensus algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 104-111.
- [22] MI Y, GUO J, FU Y, et al. Accurate power allocation of multienergy storage island dc microgrid based on virtual power rating[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 38(1): 261-270.
- [23] XIA Y, YU M, YANG P, et al. Generation-storage coordination for islanded DC microgrids dominated by PV generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 34(1): 130-138.
- [24] ZHANG Q, ZENG Y, LIU Y, et al. An improved distributed cooperative control strategy for multiple energy storages parallel in islanded DC microgrid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 10(1): 455-468.
- [25] MI Y, DENG J, CHANG J, et al. State of charge balancing strategy for energy storage system in islanded DC microgrid based on micro-tuning virtual resistance[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 209: 107921.
- [26] 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, 2018, 66(3): 1883-1893.

收稿日期: 2023-05-08; 修回日期: 2023-07-12

作者简介:

陈勃旭(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流微电网控制、储能系统控制; E-mail: 1435399958@qq.com

崔炜(1978—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子技术、信号处理技术及机器人感知技术; E-mail: cuiwei@cust.edu.cn

陈宇(1980—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为智能信息处理、智能感知。E-mail: 66066001@qq.com

(编辑 张颖)