

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415962

# 考虑容量差异的多储能 SOC 均衡控制策略<sup>\*</sup>

罗沁<sup>1,2</sup> 王嘉梅<sup>1,2</sup> 黄璇<sup>1,2</sup> 李华鑫<sup>1,2</sup> 盛祥瑞<sup>3</sup>(1. 云南民族大学电气信息工程学院 昆明 650504; 2. 云南省无人自主系统重点实验室 昆明 650504;  
3. 国网重庆市电力公司开州供电分公司 重庆 405400)

**摘要:** 孤岛式直流微电网系统需要配置多组 DESUs, 以应对不同的负荷需求和能源波动。考虑 DESUs 具有不同容量时, 由于线路中阻抗不匹配, SOC 均衡效果受到严重影响, 为此, 提出一种考虑不同容量的多储能 SOC 均衡控制策略。首先, 通过含加速因子的指数函数建立 SOC 与下垂系数之间的关系, 提升下垂系数对 SOC 均衡后期变化的灵敏性, 实现下垂系数的自适应调节。各 DESU 仅通过稀疏通信网络与邻居节点交换状态信息, 并采用动态一致性算法获取全局平均状态信息。设计一种多目标控制器, 其能够在补偿母线电压跌落的同时实现负荷功率的准确分配, 消除不匹配线阻的影响, 减少控制流程, 减轻系统通信负担。最后, 基于 MATLAB/Simulink 软件搭建了仿真模型, 并在各种复杂工况下证实了所提控制策略的有效性。

**关键词:** 直流微电网; 储能单元; 荷电状态; 多目标控制器; 电压恢复; 功率分配

**中图分类号:** TM721.1; TN915 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Multi-energy SOC balancing control strategy considering capacity difference

Luo Qin<sup>1,2</sup> Wang Jiamei<sup>1,2</sup> Huang Xuan<sup>1,2</sup> Li Huaxin<sup>1,2</sup> Sheng Xiangrui<sup>3</sup>(1. School of Electrical and Information Engineering, Yunnan Minzu University, Kunming 650504, China;  
2. Yunnan Key Laboratory of Unmanned Autonomous System, Kunming 650504, China;  
3. State Grid Chongqing Power Company, Kai County Power Supply Branch, Chongqing 405400, China)

**Abstract:** Islanded DC microgrid systems need to be configured with multiple DESUs to cope with different load demands and energy fluctuations. Considering DESUs with different capacities, the SOC balancing effect is seriously affected due to the impedance mismatch in the line; for this reason, a multi-storage SOC balancing control strategy considering different capacities is proposed. Firstly, the relationship between SOC and the droop coefficient is established by an exponential function containing an acceleration factor, which improves the sensitivity of the droop coefficient to the late change of SOC balancing and realizes the adaptive adjustment of the droop coefficient. Each DESU only exchanges state information with neighboring nodes through a sparse communication network and adopts a dynamic consistency algorithm to obtain the global average state information. A multi-objective controller is designed, capable of compensating bus voltage dips while achieving accurate distribution of load power, eliminating the effect of mismatched line resistance, reducing the control process, and alleviating the system communication burden. Finally, a simulation model is built based on MATLAB/Simulink software, and the effectiveness of the proposed control strategy is confirmed under various complex operating conditions.

**Keywords:** DC microgrid; energy storage unit; state of charge; multi-objective controller; voltage recovery; power distribution

## 0 引言

随着双碳目标的提出, 全球对可再生能源(renewable energy source, RES)的需求率和利用率显著增加<sup>[1-2]</sup>。清洁

能源, 如太阳能和风能等分布式发电(distributed generators, DG)能源, 成为关注的焦点<sup>[3]</sup>。这一趋势推动了可再生能源技术的创新与发展。直流微电网由于具有高度可靠、灵活性强、高效节能、环保等诸多优点, 逐渐成为研

收稿日期: 2024-04-30

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金(61963038)、云南省教育厅科研基金重大专项(ZD2013013)资助

究的热点<sup>[4-5]</sup>。由于可再生能源如风能和太阳能易受到天气和自然环境的影响,其电力输出可能会出现波动和不确定性。为了应对这种不稳定性,常常需要在系统中引入分布式储能系统(distributed energy storage system, DESS)<sup>[6]</sup>。DESS 在可再生能源供电过剩时进行储存,而在供电不足时释放能量,从而平衡电网的供需之间的差异,确保电网稳定运行<sup>[7]</sup>。

在直流微电网中,常使用 P-U 下垂控制策略来管理线路上的变流器,以确保系统稳定运行并优化能量传输<sup>[8]</sup>。然而,传统的下垂控制采用固定的下垂系数,受到线路阻抗不匹配的影响,导致分布式储能单元(distributed energy storage units, DESUs)输出功率分配不够准确<sup>[9-10]</sup>。此外,下垂控制未考虑到荷电状态(state of charge, SOC)的相关信息,导致储能单元之间的 SOC 无法实现均衡。在这种情况下,储能系统的安全运行问题无法得到保障<sup>[11]</sup>。为了克服下垂控制的限制并实现 SOC 均衡,许多学者提出了相应的解决方案。文献[12-16]通过将 SOC 与下垂系数相关联实现下垂系数的自适应调节,以实现 SOC 的均衡以及负荷功率分配的目标。然而,然而,母线电压下降的问题仍然没有得到较好的解决。在直流微电网系统中,由于线路阻抗的不匹配,负荷功率分配的精度不可避免地受到影响,进而影响了上述提及的控制方法。这种情况削弱了 SOC 均衡的效果,增加了系统运行的复杂性和不确定性。

为了解决线路阻抗不匹配引起的问题,并加速 DESUs 的 SOC 均衡效果。文献[17]采用多代理滑动模式来消除线路中不匹配电阻产生的影响,以确保在充放电过程中根据 SOC 的大小选择充电或放电,以实现 SOC 均衡的目标。然而,在系统出现暂态输出功率差异时,无法避免 DESU 产生过度充放电现象。文献[18]提出测量线路阻抗的方法,通过补偿线路阻抗差异对下垂系数进行校正,从而实现功率分配效果。但其易受到外界因素的影响,导致控制精度不够高。文献[19]通过引入虚拟电流的概念,提出了一种负载共享算法,利用 SOC 信息获取下垂系数。消除线路阻抗不匹配所带来的影响,从而实现电池组 SOC 的均衡。文献[20]通过对各储能单元与主导储能单元间 SOC 差异对下垂系数进行调节,从而实现 SOC 均衡,但其均衡速度较慢。文献[21]采用自适应下垂控制以消除线路阻抗不匹配的问题,根据储能单元的 SOC 大小进行自适应充放电。然而,以上方法仅考虑了储能单元具有相同容量的控制运行情况。然而,在储能单元频繁充放电的过程中,可能导致部分设备老化,从而造成储能单元的实际容量存在一定程度的差异。针对储能单元的容量差异的问题,文献[22]将 SOC 均衡函数的初始下垂系数设置为与 DESUs 的容量成反比,从而以满足不同容量的储能单元 SOC 均衡问题。文献[23]提出指数型下垂控制策略,并设置容量权重因子实现容量不等的 DESUs 的 SOC 均衡,但其未考虑线路阻抗不匹配带来的影响,也未对母线电压存在的跌落进行恢复。

鉴于上述问题,本文提出了一种多储能 SOC 快速均衡控制策略,充分考虑储能单元之间的容量差异。采用动态平均一致性算法,获取全局平局状态信息。设计含加速因子的指数函数构建 SOC 与下垂系数之间的关系,实现下垂系数的自适应调节,改善 SOC 均衡后期均衡缓慢的问题,加快 SOC 均衡速度。设计一种多目标控制器,以精确分配负荷功率的同时补偿母线电压跌落,减少了控制环节。该方法仅利用相邻单元的通信网络,旨在确保系统的稳定运行,并减轻系统通信负担。

## 1 微网系统结构与传统下垂控制

### 1.1 孤岛直流微电网系统结构

孤岛直流微电网通常由风力发电、光伏发电、负载以及多组 DESU 组成,其典型结构图如图 1 所示。为了能够达到 RES 的高效利用,光伏、风力发电单元持续工作在最大功率跟踪(MPPT)模式。通常,DESS 由多组蓄电池通过双向 DC/DC 变换器并联组成<sup>[24]</sup>。由于 RES 的波动性和随机性,DESS 需要频繁工作,对功率差额进行补偿。为了延长 DESS 的使用寿命并提高系统的稳定性和可靠性,必须确保每个储能单元的 SOC 均衡<sup>[25-26]</sup>。该措施不仅有助于减少系统在高负载情况下的压力,还可以优化能量存储和释过程<sup>[27]</sup>。

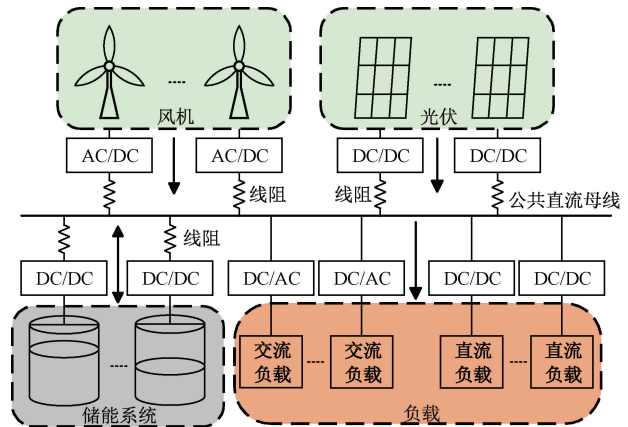


图 1 孤岛直流微电网结构

Fig. 1 Structure of an islanded DC microgrid

### 1.2 传统下垂控制分析

传统 P-U 下垂控制表达式为:

$$V_{refi} = V_{ref} - m_{di} P_i \quad (1)$$

式中: $V_{ref}$  为直流母线额定电压, $V_{refi}$ 、 $m_{di}$ 、 $P_i$  为 DESU<sub>i</sub> 的变流器输出电压参考值、下垂系数和输出功率。2 组 DESUs 并联等效电路如图 2 所示,其中  $I_{oi}$ 、 $V_{oi}$  为 DESU<sub>i</sub> 的变流器输出电流、输出电压, $R_{linei}$  为线路阻抗, $V_{bus}$  为母线电压; $R_{load}$  为负载阻抗。

由图 2 可知,在不忽略线路阻抗的情况下,变流器输出电流和输出功率表达式为:

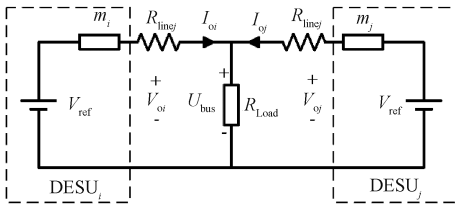


图 2 DESUs 并联等效电路

Fig. 2 DESUs parallel equivalent circuit

$$\begin{cases} I_{oi} = \frac{V_{ref} - V_{bus}}{m_{di} + R_{linei}} \\ I_{oj} = \frac{V_{ref} - V_{bus}}{m_{dj} + R_{linej}} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_i = (R_{linei} I_{oi} + V_{bus}) I_{oi} \\ P_j = (R_{linej} I_{oj} + V_{bus}) I_{oj} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可得出:

$$\frac{P_i}{P_j} = \frac{I_{oi}}{I_{oj}} \left( \frac{R_{linei} I_{oi} + V_{bus}}{R_{linej} I_{oj} + V_{bus}} \right) \quad (4)$$

采用库伦计数法获取 DESUs 实时 SOC, 其表达式为:

$$SOC_i = SOC_{i0} - \frac{1}{C_i} \int_0^t I_i dt \quad (5)$$

式中:  $SOC_i$  为  $DESU_i$  的实时荷电状态,  $SOC_{i0}$  为  $DESU_i$  的初始荷电状态,  $C_i$  为  $DESU_i$  的容量,  $I_i$  为  $DESU_i$  的蓄电池输出电流。假设系统中的 DC/DC 变流器为理想变流器, 忽略损耗, 可将式(5)改写为:

$$SOC_i = SOC_{i0} - \frac{1}{C_i V_i} \int_0^t P_i dt \quad (6)$$

式中:  $V_i$  为  $DESU_i$  的蓄电池输出电压, 对式(6)求导, 可得:

$$SOC'_i = -\frac{P_i}{C_i V_i} \quad (7)$$

由式(7)可知系统运行时, 各蓄电池输出电压相等的情况下, DESS 的充放电速度由输出功率和容量决定。

$$\frac{SOC'_i}{SOC'_j} = \frac{P_i C_j}{P_j C_i} \quad (8)$$

从式(4)、(8)可以得知, SOC 的均衡与线路阻抗、下垂系数以及 DESUs 容量密切相关。鉴于不同容量和线路阻抗不匹配的情况, 为了快速实现 SOC 的均衡, 需对下垂系数进行自适应调节。根据式(1), 下垂控制会导致母线电压下降, 因此需要对母线电压跌落进行补偿。

为实现 SOC 的均衡, 文献[14]提出一种指数型下垂控制, 其表达式如下:

$$m_{di} = \begin{cases} m_0 \exp(p(SOC_i - SOC_{ave})), & I_{oi} < 0 \\ m_0 \exp(-p(SOC_i - SOC_{ave})), & I_{oi} > 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$SOC_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^N SOC_i}{N} \quad (10)$$

式中:  $m_0$  为初始下垂系数;  $p$  为均衡系数;  $SOC_{ave}$  为平

均 SOC。

文献[15]基于文献[14], 提出幂函数与指数函数嵌套的下垂控制, 其表达式如下:

$$m_{di} = \begin{cases} m_0 \exp(p(SOC_i^n - SOC_{ave}^n)), & I_{oi} < 0 \\ m_0 \exp(-p(SOC_i^n - SOC_{ave}^n)), & I_{oi} > 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $n$  为系数;  $p$  为均衡系数。

文献[16]基于文献[14], 引入一种变化系数  $k_i$ , 加速 SOC 均衡, 其表达式如下:

$$m_{di} = \begin{cases} m_0 \exp(pk_i(SOC_i - SOC_{ave})), & I_{oi} < 0 \\ m_0 \exp(-pk_i(SOC_i - SOC_{ave})), & I_{oi} > 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$k_i = \frac{1}{\alpha |SOC_i - SOC_{ave}| + \beta} \quad (13)$$

在 SOC 均衡后期, 由于 DESUs 之间的 SOC 均衡差异的逐渐减小, SOC 均衡速度越来越慢。通过引入变化系数  $k_i$ , 在 SOC 均衡后期,  $\alpha |SOC - SOC_{ave}|$  逐渐趋近于 0, 变化系数变为  $1/\beta$ , 为达到 SOC 快速均衡的目标, 其值因小于 1。在 SOC 均衡前期, 为消除  $\beta$  的影响,  $\alpha |SOC - SOC_{ave}|$  应远大于  $\beta$ 。

## 2 储能系统 SOC 均衡控制策略研究

### 2.1 基于 SOC 的自适应下垂控制

针对不同容量和线路阻抗不匹配对微网系统 DESUs 的均衡效果造成的影响, 需要采取措施以确保蓄电池在充放电过程中的稳定性和一致性, 避免出现过充和过放的风险, 本研究结合传统的  $P-U$  下垂控制策略, 利用  $e$  指数函数建立了 SOC 与下垂系数之间的关系, 设计了一种全新的 SOC 均衡加速因子, 以实现下垂系数的自适应调节, 加快 SOC 收敛。具体表达式如下:

$$m_{di} = \frac{m_0}{C_i} e^{\text{sgn}(I_{oi}) p k_i \Delta SOC_i} \quad (14)$$

$$\Delta SOC_i = SOC_{ave} - SOC_i \quad (15)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $m_0$  为初始下垂系数, 其值为最大母线电压偏差  $\Delta V_{max}$  和最大输出功率  $P_{max}$  之比;  $p$  为收敛系数;  $\text{sgn}()$  为符号函数, 用于表示充放电状态;  $k_i$  为加速因子, 其表达式为:

$$k_i = \frac{1}{\omega_i + \beta} \quad (17)$$

$$\omega_i = \frac{1}{SOC_{ave}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta SOC_i^2}{N}} \quad (18)$$

式中:  $\beta$  为调节系数,  $0 < \beta < 1$ 。由式(17)可知, 当  $\Delta SOC_i$  和  $\Delta SOC_j$  逐渐趋向于 0 时, 由于调节系数  $\beta$  的存在, 各个

DESU 之间的 SOC 偏差被放大,从而有利于快速实现 SOC 的均衡控制。在 SOC 均衡前期,DESUs 之间的 SOC 差异性较大,为避免调节系数  $\beta$  对 SOC 均衡产生影响, $w_i$  应  $\gg \beta$ ,系数  $w_i$  通过自适应变化,采样平均 SOC 均衡误差,推进 SOC 均衡进程,在 SOC 均衡前期不仅能够自适应调节 SOC 均衡速度,还能够对输出功率进行限制,预防输出功率超限,保证 DESUs 的安全运行。

为保证 DESUs 的正常工作,需要将其 SOC 工作范围进行限制。DESUs 的 SOC 工作范围为  $[0.2, 0.9]$ ,故  $SOC_{ave}$  为  $[0.2, 0.9]$ 。

假设 DESUs 为放电状态,初始下垂系数相等,  $I_{oi} > 0$ ,  $\text{sgn}(I_{oi}) = 1$ 。由式(6)可得出 DESUs 之间的 SOC 差异为:

$$\Delta SOC_{ij} = SOC_{i0} - SOC_{j0} - \frac{1}{C_i V_i} \int_0^t P_i dt + \frac{1}{C_j V_j} \int_0^t P_j dt \quad (19)$$

对式(19)进行求导:

$$\Delta SOC'_{ij} = \frac{1}{C_i V_i} (P_j - P_i) \quad (20)$$

考虑各蓄电池具有相同输出电压,变流器输出电压跟随参考电压,即:

$$V_{refi} = V_{refj} = V_{refn} = V_{ref}^* \quad (21)$$

结合式(1)、(14)可将式(20)改写为:

$$\Delta SOC'_{ij} = \frac{(V_{ref} - V_{ref}^*)}{C_i V_i m_{i0}} \left( \frac{1}{e^{k_i \Delta SOC_i}} - \frac{1}{e^{k_j \Delta SOC_j}} \right) \quad (22)$$

引入  $e^x$  的一阶泰勒展开式

$$e^x = 1 + x \quad (23)$$

式(22)可表示为:

$$\Delta SOC'_{ij} = \frac{(V_{ref} - V_{ref}^*)}{C_i V_i m_{i0}} \times [k_i (SOC_j - SOC_{ave}) - k_j (SOC_i - SOC_{ave})] \quad (24)$$

当  $SOC_{i0} > SOC_{j0}$ , 式(19)  $> 0$ , 式(24)  $< 0$ 。当  $SOC_{i0} < SOC_{j0}$ , 式(19)  $< 0$ , 式(24)  $> 0$ 。随着 DESUs 持续运行,  $SOC_i$  和  $SOC_j$  将逐渐趋于一致,满足 SOC 均衡的需求。同理,充电状态下 SOC 也会达到均衡。

## 2.2 多目标控制器

传统控制策略需要考虑母线电压稳定以及线路阻抗不匹配的两个控制要求,设计对应的母线电压恢复控制器以及功率调节器,控制过程较繁琐。本文综合考虑了母线电压补偿和负荷功率分配两方面的控制要求,设计了一种多目标控制器。通过优化控制,能够有效实现母线电压的补偿和负荷功率的精准分配,减少了 PI 控制器的使用,增加了系统的运行可靠性,减轻通信压力。

为克服线路阻抗不匹配对于 DESUs 均衡过程的影响,满足不同容量的储能单元 SOC 均衡效果,需要对 DESUs 输出功率进行实时补偿,以确保负荷输出功率按照容量比例分配。

为方便说明,本文引入  $Q_{avei}$ 、 $Q_i$ , 定义如下:

$$Q_i = m_{di} P_i \quad (25)$$

$$Q_{avei} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{N} \quad (26)$$

在理想情况下,  $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n$ , 各 DESUs 应当按照各自容量成比例地分配负荷功率,线路阻抗不匹配产生的影响就会被消除。定义功率偏差为  $e_{i1}$ :

$$e_{i1} = Q_{avei} - Q_i \quad (27)$$

采用下垂控制方法会导致公共直流母线电压偏移,为解决此问题,需引入电压补偿措施,以确保系统运行不受偏差过大影响。DESUs 的平均母线电压  $V_{oave}$  为:

$$V_{oave} = \frac{\sum_{i=1}^N V_{oi}}{N} \quad (28)$$

定义母线电压恢复偏差为  $e_{i2}$ :

$$e_{i2} = V_{ref} - V_{oave} \quad (29)$$

母线电压补偿、负荷功率分配统一控制器设计如下:

$$\Delta u_i = (ae_{i1} + be_{i2}) (K_p + \frac{K_i}{S}) \quad (30)$$

式中:  $K_p$ 、 $K_i$  分别为 PI 控制器比例系数、积分系数。引入系数  $a$  和  $b$ , 有助于抑制输出功率的波动并提高 SOC 均衡效果,其控制框图如图 3 所示。

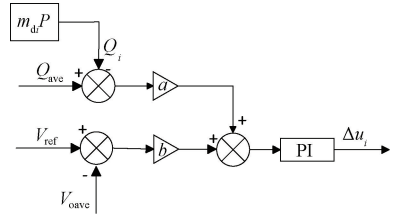


图 3 多目标控制器

Fig. 3 Multi-objective controller

该策略仅借助一个简单 PI 控制器,即可实现母线电压稳定和负荷功率按照容量比例精准分配,从而显著降低了系统的运行成本,细化了控制流程,减少了操作复杂度。结合上述策略,本文所提考虑容量差异的 SOC 均衡控制策略可表示为:

$$V_{refi} = V_{ref} - m_{di} P_i + \Delta u_i \quad (31)$$

## 2.3 动态一致性算法

一致性问题,也称为多智能体的分布式协调问题,它们的共同之处在于通过设计适当的协调控制率或一致性协议,使得网络中的各个智能体的值逐渐趋于一致<sup>[28]</sup>。在一致性控制中,通过构建稀疏通信网络,只需相邻智能体之间交换电气信息,从而简化通信拓扑结构。能够有效减轻系统通信负担,减少单点故障等不利因素的影响,有助于系统控制的稳定运行和灵活适应<sup>[29]</sup>。本文利用改进的动态一致性算法估算全局平均状态信息  $SOC_{ave}$ 、 $Q_{avei}$  以及  $V_{oave}$ 。

为加快一致性算法的快速收敛,使其更适用于直流微电网运行稳定性控制,文献<sup>[30]</sup>提出一种改进的动态一致

性算法,其表达式如下:

$$\begin{cases} x_{avei}(k+1) = x_i + \sum_{j \in N_i} a_{ij} D_{ij}(k+1) \\ D_{ij}(k+1) = D_{ij}(k) + \delta_{ij} [x_{avej}(k) - x_{avei}(k)] \end{cases} \quad (32)$$

式中:  $x_i$  为需要求平均值的数据,需要从本地采样获取;  $N_i$  为节点  $i$  的邻居单元集合;  $x_{avei}(k)$  和  $D_{ij}(k)$  为第  $k$  次迭代后获取的平均状态信息以及迭代累计差值;  $\delta$  表示有无通信连接,  $\delta=1$  表示有通信连接,  $\delta=0$  表示无通信连接;  $a_{ij}$  表示连接权重,为保证算法收敛稳定性,其可由以下表达式获取:

$$a_{ij} = \frac{2}{\lambda_1(\mathbf{L}) + \lambda_{M-1}(\mathbf{L})} \quad (33)$$

式中:  $\lambda_1(\mathbf{L})$  表示为拉普拉斯矩阵  $\mathbf{L}$  中最大的特征值,  $M$  表示节点总数。

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} d_1 & l_{12} & \cdots & l_{1N} \\ l_{21} & d_2 & \cdots & l_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{N1} & l_{N2} & \cdots & d_N \end{bmatrix} \quad (34)$$

式中:  $d_i$  表示节点  $i$  的度,即与节点  $i$  进行通信的节点数;  $l_{ij} = -1$  表示  $i$  和  $j$  为邻居节点,否则  $l_{ij} = 0$ 。

网络系统中智能体间的相互作用关系由通信拓扑图表示。多储能通信拓扑结构如图 4 所示,以确保系统在任意两个 DESU 之间发生通信故障或任意 DESU 因故障而停止工作时仍能保持稳定运行,旨在增强系统的鲁棒性和可靠性。在分布式系统中,每个 DESU 被当作一个节点,依据一致性协议进行信息交流。在这种结构下,多个智能体之间相互平等协作,地位相同且具有相等的优先级,从而确保系统中各个部分的均衡性和一致性。这种设计不仅提高了系统的可扩展性和容错能力,还使得系统更具适应性和应对突发情况的能力。

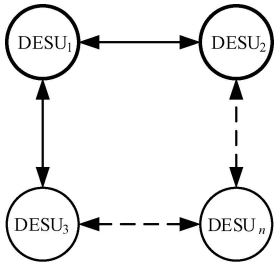


图 4 多 DESUs 通信拓扑网络

Fig. 4 Multi-DESUs communication topology network

### 3 仿真实验

为验证所提策略的有效性,基于 MATLAB/Simulink 仿真软件平台,搭建孤岛直流微电网模型,模型包括 3 个 DESU、1 个光伏发电单元、各种不同大小的负载。其中:光伏发电单元始终处于 MPPT 模式,采用蓄电池组成 DESUs,通过双向 DC/DC 变换器与直流母线相连。仿真

考虑正常充放电、负荷波动、光伏输出功率波动、出现冲击负荷以及 DESUs 故障的情况下,验证所提控制策略能实现 SOC 快速均衡、负荷功率精准分配以及母线电压问题三个控制目标。系统整体控制图如图 5 所示,仿真参数见表 1。

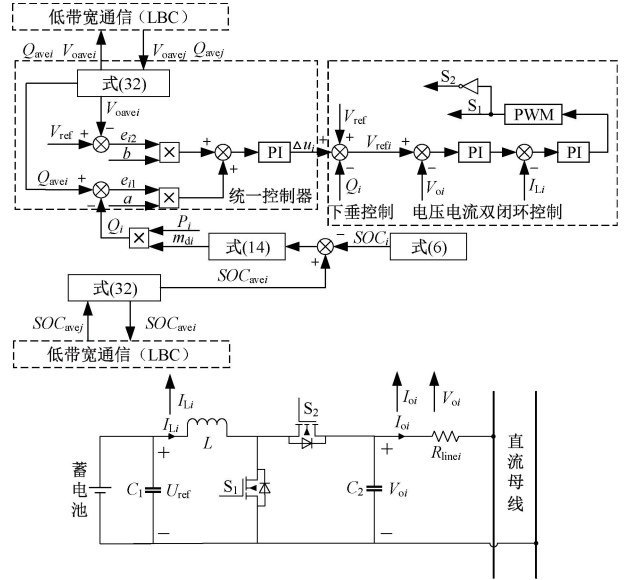


图 5 整体控制图

Fig. 5 Overall control chart

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
电容 $C_1, C_2 / \mu\text{F}$	200, 400
电感 $L / \mu\text{H}$	900
线路阻抗 $R_{line}$	0.1, 0.2, 0.3
母线额定电压 $V_{ref} / \text{V}$	700
蓄电池额定电压 $V_i / \text{V}$	400
最大母线电压偏差 $\Delta V_{max} / \text{V}$	35
最大输出功率 $P_{max} / \text{kW}$	10
初始下垂系数 $m_0$	0.003 5
$\beta, a, b$	0.01, 0.1, 1
统一控制器 PI 参数	0.5+15/s

#### 3.1 工况 1: 正常充放电

在 DESUs 正常充放电的情况下,验证所提控制策略在忽略线路阻抗以及考虑线路阻抗不匹配的情况下,能否实现 SOC 均衡,削弱输出功率的波动,稳定直流母线电压并能按照容量进行负荷输出功率精准分配,并与文献[15]和文献[16]所提控制策略进行对比。

##### 1) DESUs 正常充电

在充电状态下,忽略线路阻抗,DESUs 初始 SOC 分别为 20%、30%、40%,容量  $C$  均为 0.3 Ah,光伏输出功率  $P_g$  为 8.1 kW,负载  $R_{load}$  为 400  $\Omega$ 。DESUs 的 SOC、输出功率与直流母线电压的仿真结果如图 6 所示。

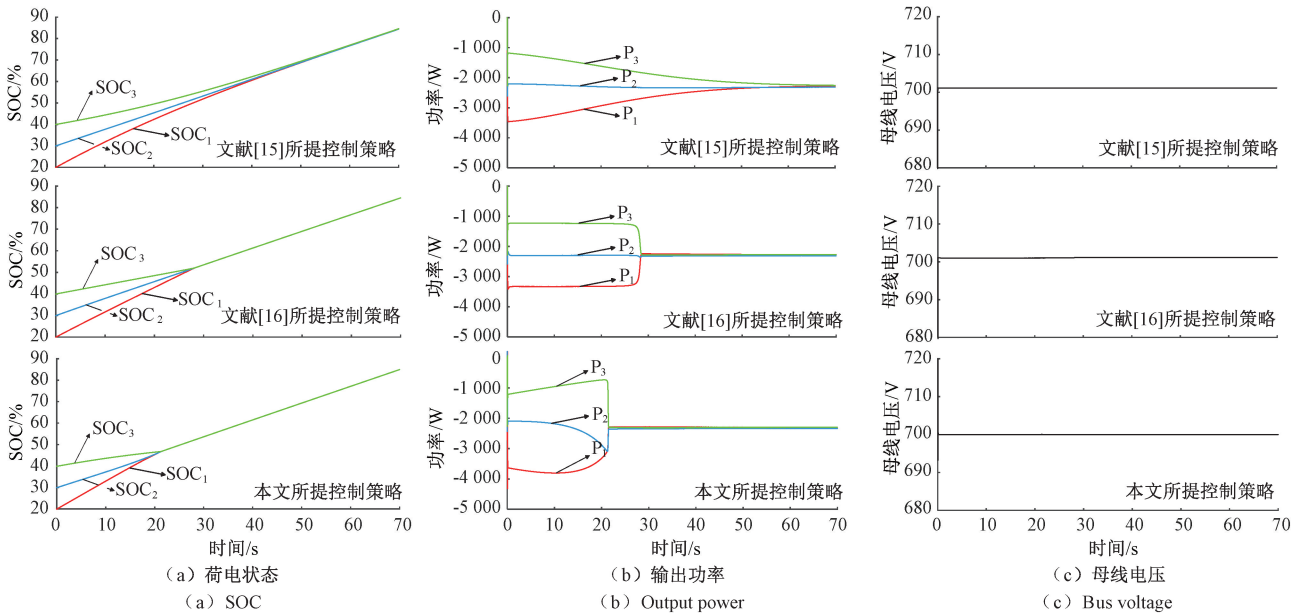


图 6 工况 1:忽略线路阻抗正常充电

Fig. 6 Condition 1: Normal charging ignoring line impedance

如图 6(a)、(b)、(c)所示,随着 SOC 均衡过程的不断推进,储能单元之间的 SOC 差异逐渐减小,文献[15]所提控制策略的 SOC 均衡速度愈来愈慢,在大约 60 s 时才能实现均衡,输出功率偏差较大, SOC 均衡速度较慢。

在 70 s 时,输出功率偏差为 95 W。文献[16]所提出变化系数可通过调节系数  $\alpha$  和  $\beta$  来调节输出功率和 SOC 均衡速度,但其系数设置较为繁琐。在  $t=29$  s, SOC 收敛,输出功率逐渐趋于一致,但其母线电压一直不能跟随额定值,在 70 s 时,输出功率偏差为 50 W。在本文所提控制策略下,通过结合全局平均 SOC 均衡差异信息的控制系数  $k_i$  和调节系数  $d$  自适应调节下垂系数,可以获得较优的 SOC 均衡速度和均衡效果,随着 SOC 均衡过程的进行,能够加快 SOC 收敛。在  $t=21$  s, SOC 实现均衡,并在之后一直保持较好的均衡效果,输出功率按照容量分配,在 70 s 时,输出功率偏差为 42 W,系统电能质量得到了很好的提升。本文所提出的控制策略相较于文献[15]和[16],加快了 SOC 均衡速度,减小了 DESUs 的输出功率偏差,直流母线电压得到持续稳定。

2) DESUs 正常放电

在放电状态下,考虑线路阻抗不匹配, DESUs 初始 SOC 分别为 90%、80%、70%,容量  $C$  为 0.2、0.3、0.4 Ah,光伏输出功率  $P_g$  为 1.05 kW,负载  $R_{load}$  为 80  $\Omega$ 。DESUs 的 SOC、输出功率与直流母线电压的仿真结果如图 7 所示。如图 7(a)、(b)、(c)所示,有文献[15]和[16]所提控制策略未考虑 DESUs 容量差异以及线路阻抗不匹配的影响,随着放电过程的不断地深入, SOC 出现交叉现象,无法实现均衡,更不能按容量成比例分配负荷输出功率,且其母线电压一直低于额定值。在本文所提控制策略下,在  $t=$

18 s 时, SOC 已达到均衡状态,输出功率按照容量比例实现精准分配,在  $t=70$  s 时,输出功率为 1 115 W、1 670 W、2 224 W,近似等于容量之比 2 : 3 : 4,母线电压持续跟随额定值,系统稳定性优越。相较于文献文献[15]和文献[16],本文充分考虑容量差异问题以及线路阻抗不匹配的影响,所提控制策略可确保 DESUs 输出功率按照容量精准分配, SOC 均衡迅速,母线电压补偿效果良好。

3.2 工况 2:负荷频繁变化

在负载频繁变化情况下,验证所提控制策略能否保证 SOC 的快速均衡、DESUs 输出功率按照容量精准分配以及母线电压的稳定,该工况旨在确保系统能否迅速适应负荷变化,保持电力供应的稳定性和可靠性。需要系统具备快速调节电源输出的机制,最大程度减轻系统压力,保持微电网的稳定运行。各 DESUs 初始 SOC 分别为 80%、70%、60%,额定容量  $C$  为 0.2、0.3、0.4 Ah,光伏发电单元功率  $P_g$  为 3.73 kW,线路阻抗分别为 0.1、0.2、0.3  $\Omega$ , 0 s 时  $R_{load}$  为 50  $\Omega$ , 10 s 时  $R_{load}$  为 100  $\Omega$ , 20 s 时  $R_{load}$  为 500  $\Omega$ , 30 s 时  $R_{load}$  为 800  $\Omega$ , 40 s 时  $R_{load}$  为 400  $\Omega$ , 50 s 时  $R_{load}$  为 80  $\Omega$ , 60 s 时  $R_{load}$  为 40  $\Omega$ 。DESUs 的 SOC、输出功率与直流母线电压的仿真结果如图 8 所示。

如图 8(a)、(b)、(c)所示,系统中负荷持续发生频繁变化,系统在充电、放电状态持续切换,但储能系统 SOC 仍然保持收敛趋势。在 43 s 之后, SOC 已达到均衡,但其均衡状态未受到系统负荷变化的影响,保持高效的均衡效果,其输出功率也能够保持高精度的分配要求,在 45 s 处于充电状态, DESUs 输出功率为 -580 W, -876 W, -1 165 W。在 70 s 处于放电状态,输出功率为 1 930 W, 2 890 W, 3 901 W, 其近似等于容量之比 2 : 3 : 4。直流母线电压在负荷变化

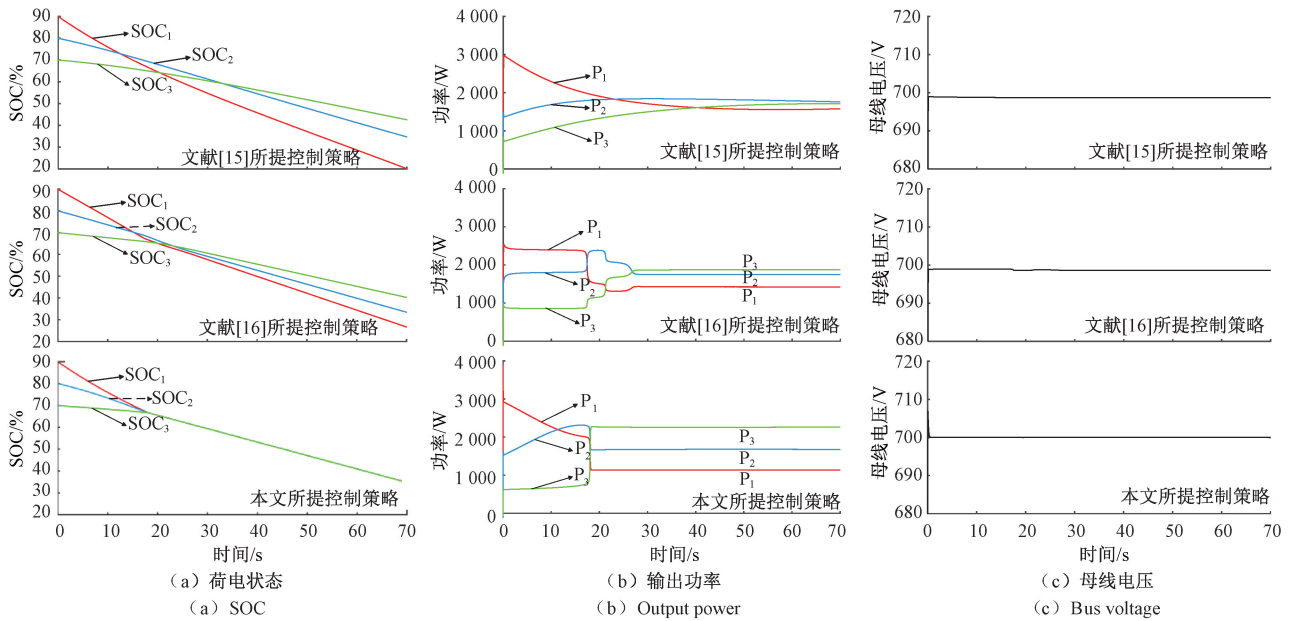


图 7 工况 1:考虑不匹配线阻正常放电

Fig. 7 Condition 1: Normal discharge considering mismatched line resistance

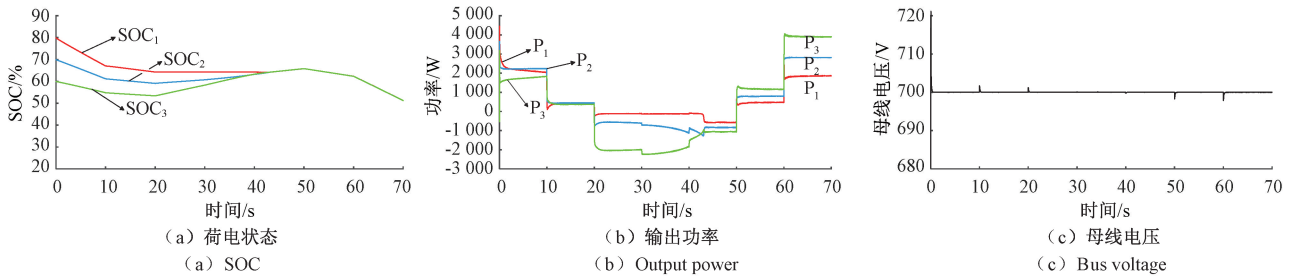


图 8 工况 2:负荷频繁变化

Fig. 8 Condition 2: Frequent load changes

影响下,会发生一定变化,但经过短时间调整,母线电压会迅速恢复到额定值,体现了系统的弹性和可扩展性。

### 3.3 工况 3: 光伏输出功率波动、冲击负荷

在光伏输出功率发生波动、以及出现负荷频繁投切的情况下,验证本文所提控制策略能否确保 SOC 的快速均衡、负荷功率按照容量精准分配以及母线电压持续稳定。DESUs 初始 SOC 分别为 30%、40%、50%,容量  $C$  为 0.4、0.3、0.2 Ah,光伏输出功率  $P_g$  为 7 kW,线路阻抗分别为 0.1、0.2、0.3  $\Omega$ ,负荷  $R_{load}$  为 150  $\Omega$ ,15 s 时光伏输出功率  $P_g$  变为 700 W,30 s 时光伏功率  $P_g$  变为 8.17 kW,在 40 s、48 s、56 s 时出现 50  $\Omega$  的冲击负荷,持续时间为 4 s。DESUs 的 SOC、输出功率与直流母线电压的仿真结果如图 9 所示。

如图 9(a)、(b)、(c)所示,在仿真刚开始时,引入所提控制策略,下垂系数依据储能单元的 SOC 与容量实现自适应变化。在 15 s 时,系统由充电状态转变为放电状态,30 s 时,系统由充电状态转变为放电状态,40 s 时,出现冲击负

荷,但是储能单元的 SOC 收敛趋势未受到改变。在 47 s 后 SOC 达到均衡,后续虽存在负荷投切现在,SOC 均衡状态依旧不受影响,DESUs 输出功率按照容量比例分配。在 70 s 时,输出功率为 -2 165 W、-1 645 W、-1 090 W,近似等于容量之比 4 : 3 : 2,母线电压虽有一定波动,在短时间也能迅速恢复到额定值。

### 3.4 工况 4: DESU 故障

该工况主要体现本文所提控制策略在 DESUs 发生故障时退出系统,是否影响 SOC 的均衡效果、DESUs 输出功率精准分配以及母线电压的稳定。DESUs 初始 SOC 分别为 30%、40%、50%,容量  $C$  均为 0.3 Ah,光伏输出功率  $P_g$  为 6.67 kW,线路阻抗分别为 0.1、0.2、0.3  $\Omega$ , $R_{load}$  为 120  $\Omega$ ,20 s 时光伏输出功率  $P_g$  变为 740 W,45 s 时 DESU<sub>3</sub> 因故障退出系统。DESUs 的 SOC、输出功率与直流母线电压的仿真结果如图 10 所示。

如图 10(a)、(b)、(c)所示,在 42 s 时,SOC 实现均衡,在 45 s 时,DESU<sub>3</sub> 因故障退出系统,但未影响到剩余 DESUs,

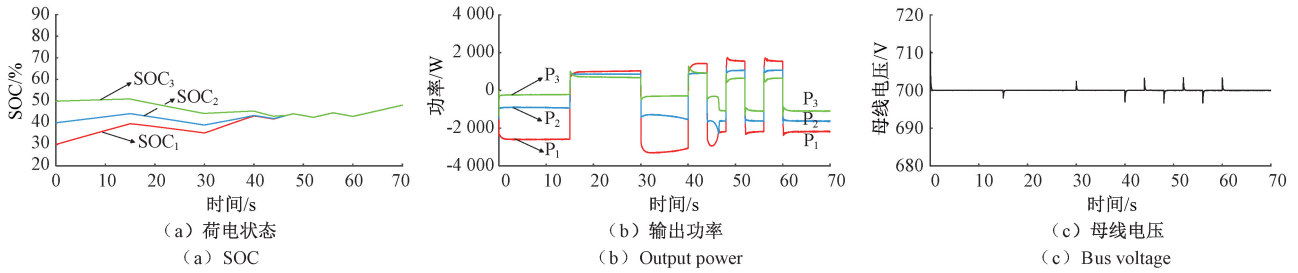


图 9 工况 3:光伏功率变化及冲击负荷

Fig. 9 Condition 3: PV power variation and shock loading

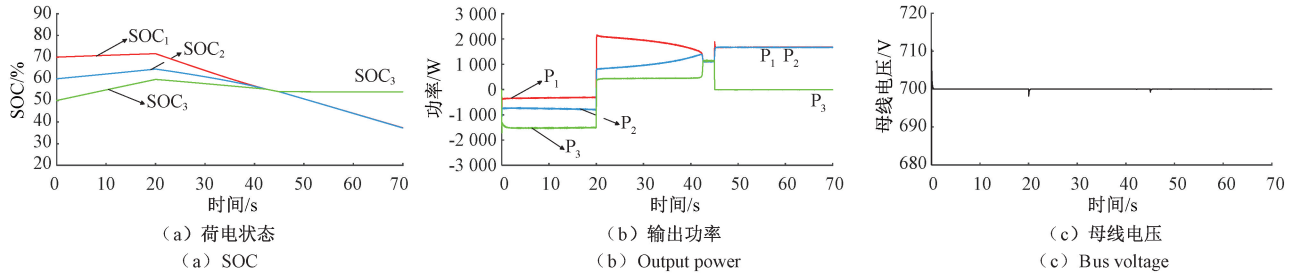


图 10 工况 4:DESU 故障

Fig. 10 Condition 4: DESU failure

其余 DESUs 仍保持原先的均衡状态,由于 DESU<sub>3</sub> 退出系统,系统切除与 DESU<sub>3</sub> 之间的通信互联,重新构建通信网络,仅在剩余 DESUs 之间通信。为保证系统功率需求,DESU<sub>1</sub>、DESU<sub>2</sub> 输出功率同时上升,仍保持较高的功率分配要求,在  $t=70\text{ s}$  时,输出功率为 1 680 W、1 675 W,近似等于容量之比 1 : 1,母线电压在 DESU<sub>3</sub> 故障退出系统后发生少量跌落,但在短时间内也能稳定在额定值。

### 4 结 论

针对容量差异和线路阻抗不匹配的情况,传统的下垂控制无法解决储能单元 SOC 均衡、负荷功率精准分配及母线电压稳定等问题。因此,本文提出了一种改进 SOC 下垂控制策略,充分考虑 DESUs 容量差异问题,通过指数函数构建 SOC 与下垂系数之间的关系,设计加速因子,实现下垂系数自适应变化,实现 SOC 快速均衡。设计一种多目标控制器,仅采用单个控制器就能消除线路阻抗不匹配的影响,实现母线电压恢复以及负荷功率精准分配两个控制目标,细化了控制流程,减小了操作复杂度。该策略采用分布式架构,仅需构建稀疏通信网络以实现邻近单元间的通信,从而能够获取全局估计平均值。降低了通信压力,提高了系统可靠性。

### 参考文献

[1] 周启星,王辉,欧阳少虎. 基于碳中和新技术的美丽中国建设[J]. 中国环境科学,2024,44(4):1777-1787.  
ZHOU Q X, WANG H, OUYANG SH H. Beautiful China construction based on carbon neutralization new technology[J]. China Environmental Science, 2024,

44(4):1777-1787.

[2] 袁越,苗安康,吴涵,等. 低碳综合能源系统研究框架与关键问题研究综述[J/OL]. 高电压技术:1-18[2024-04-26]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20232247>.  
YUAN Y, MIAO A K, WU H, et al. Review of the research framework and key Issues for low-carbon Integrated energy system [J/OL]. High Voltage Engineering: 1-18 [2024-04-26]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20232247>.  
[3] 唐西胜,李伟,沈晓东. 面向新型电力系统的储能规划方法研究进展及展望[J/OL]. 电力系统自动化:1-14 [2024-04-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240305.0851.002.html>.  
TANG X SH, LI W, SHEN X D. Research progress and prospect of energy storage planning method for new power system [J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-14 [2024-04-26] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240305.0851.002.html>.  
[4] 张文煜,李明,任巍曦,等. 基于光储控制的微电网改进预同步控制及离并网切换策略研究[J]. 电子测量技术,2022,45(16):8-14.  
ZHANG W Y, LI M, REN W X, et al. Research on improved pre synchronization control and off-grid/on-grid switching strategy of microgrid based on optical storage control [ J ]. Electronic Measurement Technology,2022,45(16):8-14.



- [5] ZULFIQAR A, YACINE T, NHAT Q L H, et al. Fault management in DC microgrids: A review of challenges, countermeasures, and future research trends[J]. IEEE ACCESS, 2021, 9:128032-128054.
- [6] 赵靖英, 高天傲, 张文煜. 基于改进 V/f 控制和虚拟振荡器的光储微网黑启动控制策略[J]. 电子测量技术, 2023, 46(20):7-15.  
ZHAO J Y, GAO T A, ZHANG W Y. Black start control strategy of solar-storage microgrid based on improved V/f control and virtual oscillator [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(20):7-15.
- [7] 李瑜, 张占强, 孟克其劳, 等. 基于改进深度确定性策略梯度算法的微电网能量优化调度[J]. 电子测量技术, 2023, 46(2):73-80.  
LI Y, ZHANG ZH Q, MENGKE Q L et al. Energy optimal dispatch of microgrid based on improved depth deterministic strategy gradient algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(2):73-80.
- [8] 洗啟鴻. 直流微网稳定性分析与功率协调控制策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2024.  
XIAN Q H. Stability analysis and power coordination control strategy research of DC microgrid[D]. Jinan: Shandong University, 2024.
- [9] 么钟然, 孙丽颖. 考虑线路阻抗的分布式储能 SOC 均衡控制策略研究[J/OL]. 中国电力:1-9[2024-04-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20240329.1658.002.html>.  
YAO ZH R, SUN L Y. Research on balanced control strategy of distributed energy storage SOC considering line impedance[J/OL]. Electric Power: 1-9[2024-04-26] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20240329.1658.002.html>.
- [10] 刘晓明, 冯梓航, 陈海, 等. 含分布式电源直流配电网短路故障暂态分析[J/OL]. 电力系统及其自动化学报: 1-10[2024-04-26]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001428>.  
LIU X M, FENG Z H, CHEN H et al. Transient fault analysis of short circuit faults in DC distribution grids with distributed generators[J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSSA: 1-10[2024-04-26] <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001428>.
- [11] 吴青峰, 杨艺涛, 刘立群, 等. 基于下垂控制的锂电池能量状态均衡控制策略[J/OL]. 电网技术:1-12[2024-04-26]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2159>.  
WU Q F, YANG Y T, LIU L Q, et al. State-of-energy balancing strategy for lithium battery based on droop control[J/OL]. Power System Technology: 1-12[2024-04-26] <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2159>.
- [12] RIBEIRO T O, APARECIDO W W S G, FRANCISCO P G D. Distribute secondary level control for energy storage management in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6):2597-2607.
- [13] LU X, SUN K, GUERRERO J M, et al. Double-quadrant state-of-charge-based droop control method for distributed energy storage systems in autonomous DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 6(1):147-157.
- [14] OLIVERIRA T R, SILVA W W A G, DONOSO-GARCIA P F. Distributed secondary level control for energy storage management in DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 8(6):2597-2607.
- [15] 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 CH, ZHANG CH 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.
- [16] 柴秀慧, 张纯江, 柴建国, 等. 改进互联通信荷电状态下下垂控制及功率均衡优化[J]. 电工技术学报, 2021, 36(16):3365-3374.  
CHAI X H, ZHANG CH J, CHAI J G, et al. Improved interconnected communication state of charge droop control and power balance optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(16):3365-3374.
- [17] MORSTYN T, SAVKIN A, 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, 2018, 9(5):4735-4743.
- [18] 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 Transactionson Power Electronics, 2018, 33(7):5561-5564.
- [19] HOANG D K, LEE H. Accurate power sharing with balanced battery state of charge in distributed DCmicrogrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3):1883-1893.

- [20] XU Y L, SHEN X W. Optimal control based energy management of multiple energy storage systems in a microgrid[J]. IEEE Access, 2018, 6: 32925-32934.
- [21] VAHIDREZA N, ALI D, FRANK L, et al. Distributed adaptive droop control for DC distribution systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 244-956.
- [22] 魏茂华, 杨苓, 翁亮涛, 等. 考虑容量差异的孤岛直流微网分布式储能单元SOC均衡策略[J/OL]. 上海交通大学学报: 1-29 [2024-07-02]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.271>.
- WEI M H, YANG L, WENG L T, et al. SOC balancing strategy for distributed energy storage units in isolated DC microgrids considering capacity differences [J/OL]. Journal of Shanghai JiaoTong University: 1-29 [2024-04-26] <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.271>.
- [23] 崔关奇, 刘毅力, 杨茵. 基于指数型下垂控制的改进SOC均衡控制策略研究[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(3): 66-73.
- CUI G Q, LIU Y L, YANG Y. Research on improved state of charge balance of strategy based on exponential droop control [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(3): 66-73.
- [24] 张博, 刘皓明, 张金波. 基于DC/DC变换器的储能电站锂电池快速均衡策略[J]. 电子测量技术, 2019, 42(20): 1-5.
- ZHANG B, LIU H M, ZHANG J B. A quick equalization strategy for lithium battery in energy storage power station based on DC/DC converter[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(20): 1-5.
- [25] 郭向伟, 王晨, 钱伟, 等. 电池储能系统均衡方法研究综述[J/OL]. 电工技术学报: 1-22 [2024-04-30]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230684>.
- GUO X W, WANG CH, QIAN W, et al. A review of equalization methods for battery energy storage system [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society: 1-22 [2024-04-30] <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230684>.
- [26] 郭慧, 汪飞, 顾永文, 等. 基于电压分层控制的直流微电网及其储能扩容单元功率协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(12): 3117-3131.
- GUO H, WANG F, GU Y W, et al. Coordinated power control strategy for DC microgrid and storage expansion unit based on voltage hierarchical control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(12): 3117-3131.
- [27] 刘迎澍, 陈曦, 李斌, 等. 多微网系统关键技术综述[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3804-3820.
- LIU Y SH, CHEN X, LI B, et al. State of art of the key technologies of multiple microgrids system [J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3804-3820.
- [28] 王志超, 刘开恩, 纪志坚, 等. 多智能体系统的分布式快速有限时间二分跟踪一致性[J/OL]. 控制与决策: 1-8 [2024-04-26]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0575>.
- WANG Z CH, LIU K E, JI ZH J, et al. Distributed fast finite time bipartite tracking consensus for multi-agent systems [J/OL]. Control and Decision: 1-8 [2024-04-26] <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0575>.
- [29] 杨珺, 侯俊浩, 刘亚威, 等. 分布式协同控制方法及在电力系统中的应用综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 4035-4049.
- YANG J, HOU J H, LIU Y W, et al. Distributed cooperative control method and application in power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19): 4035-4049.
- [30] ZHANG Q J, ZENG Y J, LIU Y C, 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.

## 作者简介

罗沁, 硕士研究生, 主要研究方向为直流微电网储能系统及分布式电源协调控制。

E-mail: lu0q995@163.com

王嘉梅(通信作者), 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为民族语言及智能电网研究。

E-mail: wangj\_2004@163.com