

# 基于线路阻抗逐次补偿的直流微电网分布式储能单元 自适应均衡控制策略

方 炜, 周 密, 史庆平, 王雷雨, 童 薇, 刘晓东, 张前进

(安徽工业大学电力电子与运动控制重点实验室, 安徽 马鞍山 243002)

**摘要:** 针对直流微电网储能单元间线路阻抗不匹配导致荷电状态(state-of-charge, SoC)不平衡, 进而引起储能单元过充或过放的问题, 提出了一种基于线路阻抗逐次补偿的自适应下垂控制策略。首先, 在线路阻抗补偿控制中, 将过程分为三个阶段: 第一阶段通过对输出电流积分更新下垂系数; 第二阶段将积分中间时刻输出电流作为参考电流恢复母线电压; 第三阶段对均流误差进行估计, 更新迭代信号。此外, 设置切换信号, 对控制阶段进行切换, 采用一致性算法对迭代信号进行计算以更新切换信号。其次, 在 SoC 均衡控制中, 将补偿后的线路阻抗与关联 SoC 信息的单调函数加入到自适应下垂控制中, 实现储能单元的 SoC 均衡控制和均流。最后, 通过多个储能单元组成的硬件实验平台验证了所提控制策略的正确性和可行性。

**关键词:** 直流微电网; 下垂控制; 分布式储能单元; 虚拟阻抗; SoC 均衡

## Adaptive balancing control strategy for distributed energy storage units in DC microgrids based on successive line impedance compensation

FANG Wei, ZHOU Mi, SHI Qingping, WANG Leiyu, TONG Wei, LIU Xiaodong, ZHANG Qianjin

(Key Lab of Power Electronics and Motion Control, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of state-of-charge (SoC) imbalance among energy storage units in DC microgrids caused by line impedance mismatch, which can lead to overcharging or over-discharging of individual units, an adaptive droop control strategy based on successive compensation of line impedance is proposed. First, in the line impedance compensation control, the process is divided into three stages. In the first stage, the droop coefficient is updated by integrating the output current. In the second stage, the output current at the intermediate integration moment is used as the reference current to restore the bus voltage. In the third stage, the current sharing error is estimated to update the iterative signal. In addition, a switching signal is introduced to control the transitions between stages, and a consistency algorithm is used to calculate the iterative signal for updating the switching signal. Next, in the SoC balancing control, the compensated line impedance and a monotonic function associated with the SoC information are incorporated into the adaptive droop control to achieve SoC balancing and current sharing among the energy storage unit. Finally, an experimental prototype with multiple energy storage units is built to verify the feasibility and effectiveness of the proposed strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277169).

**Key words:** DC microgrid; droop control; distributed energy storage unit; virtual impedance; state-of-charge balancing

## 0 引言

随着能源、环境问题的日益加剧, 可再生能源得到了广泛关注。微电网将分布式发电单元、储能单元、负荷单元有机整合为一体, 实现了对可再生

能源的有效利用<sup>[1-2]</sup>。其中, 直流微电网损耗小、转换效率高、无需考虑相位和谐波电流等问题, 将成为未来智能电网重要的组成部分<sup>[3-4]</sup>。

由于可再生能源的输出功率存在间歇性与随机性的变化以及瞬时负荷的波动<sup>[5]</sup>, 直流微电网需要配置多个分布式储能单元(energy storage units, ESUs)来维持系统功率平衡和母线电压, 以及提供

能量支撑<sup>[6-7]</sup>。当多个 ESU 并联在直流母线上时, 通常采用下垂控制实现负荷电流的自主分配<sup>[8]</sup>。但由于线路阻抗的不匹配等因素, 导致各储能单元在运行过程中出现 SoC 不均衡现象, 从而使得部分储能单元过充、过放以及频繁投切, 缩短了储能单元的使用寿命, 情况严重时甚至危及微电网的稳定性<sup>[9]</sup>。

国内外学者对此类问题展开了大量研究。文献[10]将下垂控制与储能单元的 SoC 相关联, 通过 SoC 自适应调节下垂系数, 以此控制变换器的输出功率, 实现储能单元在放电模式下的 SoC 均衡及负荷功率平衡; 文献[11]在此基础上进一步将 SoC 的  $n$  次幂引入下垂控制, 实现充放电两种工况下 SoC 与负荷功率的动态平衡; 文献[12]建立了一种关联 SoC 函数的下垂参考电压表达式, 对输出电压偏差进行了分析; 文献[13]提出了一种模糊控制方法, 建立了 SoC 与下垂系数之间的非线性模糊逻辑关系, 实现了 SoC 的均衡。但该方法模糊控制参数较多, 难以实际应用。文献[14]通过中央控制器收集各单元的 SoC 信息, 取平均值再发送给各单元进行本地单元的 SoC 均衡, 控制精度高。但该方法需要集中控制, 提高了通信代价, 且容易出现单点故障, 可靠性低。

上述研究中均没有讨论线路阻抗不匹配的实际情况, 实际上并联储能单元之间线路阻抗的不一致将直接导致储能单元之间无法精确分配负荷电流, 从而导致上述策略无法实现 SoC 均衡。因此, 文献[15]提出通过改进下垂系数来减小线路阻抗所带来的影响, 但该方法引入过大的下垂系数, 影响了电能质量, 且无法完全抵消线路阻抗的影响; 文献[16]通过引入输出电流和 SoC 对下垂系数进行调整, 以消除线路阻抗不一致造成的影响, 但该方法与文献[14]一样使用了集中控制; 文献[17]采用分布式控制结构, 储能单元仅通过低带宽通信网络与相邻节点交换信息因子以及荷电状态信息, 通过一致性算法求取全局平均值, 实现 SoC 均衡以及稳压。但该方法的交换信息量大, 通信压力会随着节点数呈指数增加, 可靠性降低。文献[18]提出了一种基于两级架构的控制方法, 虽实现了负荷电流平衡与 SoC 均衡, 但该方法仍需依赖分布式通信来交互储能单元间的电气信息, 存在通信量较大的问题; 文献[19]通过注入微弱交流信号对线路阻抗进行测算, 得到线路阻抗信息后, 将其加入到下垂控制中, 以削弱线路阻抗不一致造成的影响。但该方法测量手段复杂, 且会对系统电能质量造成一定的影响。

基于上述分析, 针对不匹配线路阻抗引起储能单元出现的 SoC 不均衡问题, 本文提出了一种具有线路阻抗补偿功能的分布式储能单元自适应均衡控

制策略。该策略对储能单元的下垂系数、输出电流和 SoC 之间的关系进行分析, 通过对输出电流进行积分处理, 逐次对线路阻抗进行迭代补偿, 实时调节下垂控制系数, 从而消除线路阻抗不一致造成的影响, 并更新本地迭代信号; 相邻储能单元之间只需交换本地迭代信号, 通过一致性算法实现低带宽通信下的线路阻抗补偿判定, 对控制阶段进行切换; 在线路阻抗补偿完成后, 本地储能单元切换至 SoC 均衡控制阶段, 将线路阻抗和 SoC 信息作为控制参数引入自适应下垂控制中, 实现储能单元的 SoC 均衡控制和均流。所提控制策略仅仅需要传输本地迭代信号, 极大地简化了各储能单元之间的传输信息, 在弱通信条件下也可实现线路阻抗的补偿和储能单元 SoC 均衡控制。对线路阻抗补偿的收敛性和系统稳定性进行了分析和证明。最后, 搭建了一个含多储能单元的硬件实验平台, 实验结果验证了所提策略的正确性和可行性。

## 1 下垂控制

### 1.1 传统下垂控制

直流微电网中, 下垂控制常被用于负荷电流的自主分配, 其表达式为

$$v_{oi} = v_{dc} - R_{di} I_{oi} \quad (1)$$

式中:  $v_{oi}$ 、 $I_{oi}$ 、 $R_{di}$  分别为第  $i$  个功率变换器的输出电压、输出电流以及下垂系数;  $v_{dc}$  为直流母线参考电压<sup>[20]</sup>。

以并联运行的两个相同规格分布式储能单元模型为例, 如图 1 所示。图中,  $v_{bus}$  代表母线电压;  $R_{load}$  代表等效负载阻抗;  $r_{li}$  代表变换器输出口到母线公共点的等效线路阻抗。母线电压  $v_{bus}$  与输出电流  $I_{oi}$  之间的关系式为

$$v_{bus} = v_{dc} - (R_{di} + r_{li}) I_{oi} \quad (2)$$

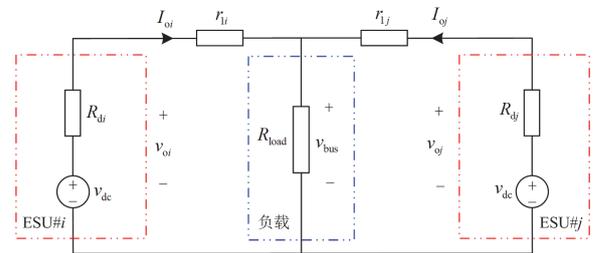


图 1 储能单元并联的简化模型

Fig. 1 Simplified model of two energy storage units connected in parallel

由式(2)可以得到两个储能单元输出电流之间的比例关系为

$$I_{oi} : I_{oj} = \frac{1}{R_{di} + r_{li}} : \frac{1}{R_{dj} + r_{lj}} \quad (3)$$

式中:  $I_{oj}$ 、 $R_{dj}$ 、 $r_{lj}$  分别为第  $j$  个功率变换器的输出电流、下垂系数以及等效线路阻抗。

由式(3)可知, 储能单元间的电流分配不仅受下垂系数的影响, 还会受到线路阻抗的影响。由于线路阻抗无法被测量, 因此通常在下垂控制中引入较大的下垂系数以削弱线路阻抗对输出电流的影响, 如图 2(a)所示。但这会引起母线电压较大的跌落且无法完全消除不匹配线路阻抗的影响<sup>[21]</sup>。期望的下垂系数调节过程应如图 2(b)所示<sup>[18]</sup>, 相比于图 2(a), 其能以更小的电压跌落对更大的线路阻抗差异进行补偿。

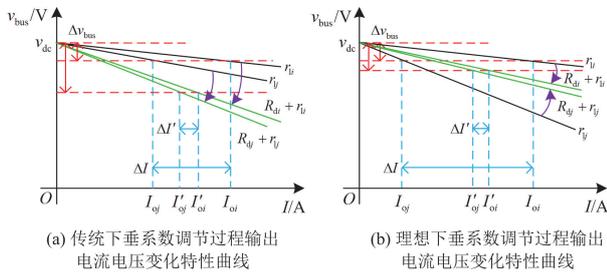


图 2 下垂系数动态调整过程

Fig. 2 Dynamic regulation process of droop coefficient

### 1.2 SoC 误差分析

SoC 表征为储能单元当前电量百分比。SoC 常用的计算方法为时安法, 其计算公式为<sup>[22]</sup>

$$S_{OCi} = S_{OCi_0} - \frac{1}{C_e} \int I_{bati} dt \quad (4)$$

式中:  $S_{OCi}$ 、 $S_{OCi_0}$  和  $I_{bati}$  分别为第  $i$  个储能单元当前的 SoC 值、SoC 的初始值以及变换器低压侧的输入电流;  $C_e$  为 ESUs 的电池容量。

在忽略功率损耗的情况下, 变换器输入端和输出端的电流呈比例关系, 如式(5)所示。

$$I_{bati} = k_c I_{oi} \quad (5)$$

式中:  $k_c$  为储能变换器输入与输出电流之间的比例系数。

因此, 式(4)可改写为

$$S_{OCi} = S_{OCi_0} - \frac{k_c}{C_e} \int I_{oi} dt \quad (6)$$

根据式(2)得到输出电流表达式为

$$I_{oi} = \frac{v_{dc} - v_{bus}}{R_{di} + r_{li}} \quad (7)$$

联立式(6)、式(7)可得

$$S_{OCi} = S_{OCi_0} - \frac{k_c}{C_e} \int \left( \frac{v_{dc} - v_{bus}}{R_{di} + r_{li}} \right) dt \quad (8)$$

两个储能单元之间的 SoC 变化速率误差  $\Delta S'_{OC\_err}$  为

$$\Delta S'_{OC\_err} = \frac{k_c}{C_e} \left( \frac{v_{dc} - v_{bus}}{R_{dj} + r_{lj}} - \frac{v_{dc} - v_{bus}}{R_{di} + r_{li}} \right) \quad (9)$$

综上所述, 线路阻抗不仅影响 ESU 的电流均衡分配, 还影响了 ESU 的 SoC 均衡。联立式(3)和式(9)可知,  $R_{di} + r_{li} = R_{dj} + r_{lj}$  是实现 ESU 负荷平衡与 SoC 均衡的必要条件。此外, 根据式(8)可知, 引入较大的下垂系数会降低 SoC 均衡的速率。因此, 文献<sup>[15]</sup>取较大下垂系数的方法不可行。

## 2 非线性下垂控制策略

虚拟阻抗调节法常被用于实现负荷平衡<sup>[18]</sup>。

$$R_{di} = k_a \int_{t_0}^{t_1} (I_{oi} - I_{ref}) dt \quad (10)$$

式中:  $R_{di}$  为虚拟阻抗调节法中的下垂系数;  $k_a$  为下垂系数的积分增益;  $t_0$  与  $t_1$  分别为积分开始与结束时刻;  $I_{ref}$  为平均电流, 定义为

$$I_{ref} = \frac{\sum_{i=1}^m I_{oi}}{m} \quad (11)$$

则两个 ESU 的下垂系数之差可以表示为

$$R_{di} - R_{dj} = k_a \int_{t_0}^{t_1} I_{oi} dt - k_a \int_{t_0}^{t_1} I_{oj} dt \quad (12)$$

对比式(11)和式(12), 第  $i$  个 ESU 的下垂系数可以改写为

$$R_{di} = k_a \int_{t_0}^{t_1} I_{oi} dt \quad (13)$$

理论上, 利用式(13)同样可以对线路阻抗进行补偿, 且相比文献<sup>[18]</sup>, 该方法无需平均电流, 仅凭本地输出电流即可实现对线路阻抗的补偿。

因此, 本文提出一种基于线路阻抗补偿的直流微电网分布式储能自适应均衡控制策略, 其控制框图如图 3 所示。控制策略大致可以分为线路阻抗迭代补偿、SoC 均衡控制两个步骤。此外, 为保证所有单元的控制步骤同时切换, 在线路阻抗补偿控制中设置一段时间用于迭代计算后的误差判断。为不失一般性, 假设有如下关系:

$$r_{li} < r_{lj} \quad (14)$$

### 2.1 线路阻抗迭代补偿

根据式(13), 设计线路阻抗补偿控制律为

$$R_{di} = k_a \int I_{oi} dt \quad (15)$$

由式(3)、式(14)和式(15)可知, 线路阻抗较小的 ESU 经过补偿后得到较大的下垂系数, 进而减小了电流均衡误差。

但较大的下垂系数会引起母线电压跌落。为此将式(15)进行迭代处理。每次迭代后,引入一个较小的下垂系数增量,以保证在实现负荷电流平衡的前提下,减小母线电压的跌落。迭代过程中输出电流与母线电压波形如图4所示。其中,  $t_{s-1}$ 、 $t_s$  分别为第  $s-1$  次和第  $s$  次迭代结束时刻,  $V_{vir}$  为下垂系数增加所引起的压降。每一次迭代过程可分为积分阶段  $[t_{s1}]$ 、母线电压恢复阶段  $[t_{s2}]$ 、判断等待阶段  $[t_{s3}]$ 。

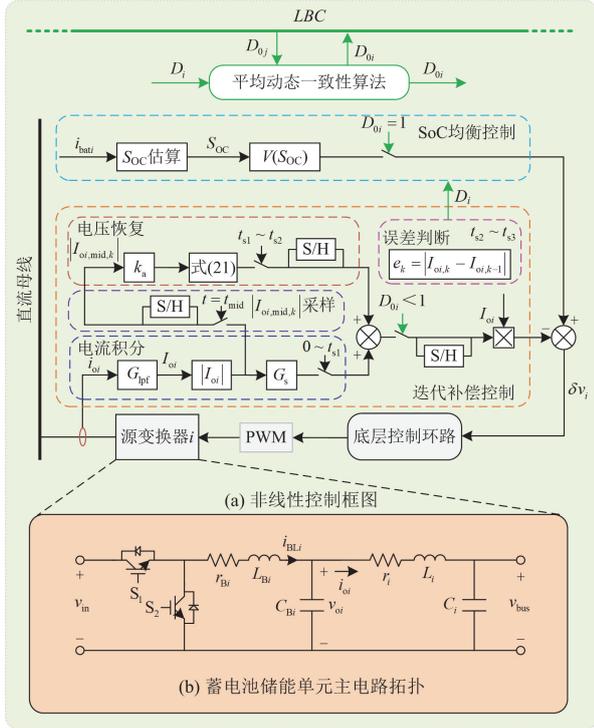


图3 所提自适应下垂控制框图

Fig. 3 Block diagram of the proposed adaptive droop control

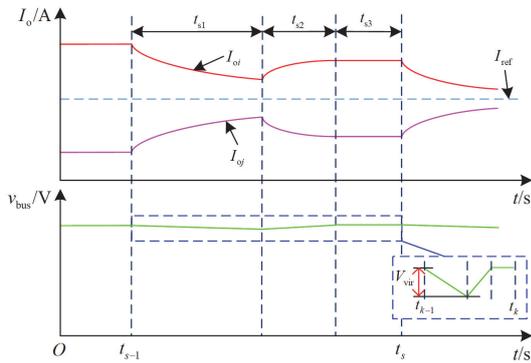


图4 第  $k$  次迭代过程中输出电流和母线电压的变化  
Fig. 4 Change of output current and bus voltage  
in the  $k$ th iteration process

积分阶段  $[t_{s1}]$ : 首先对输出电流进行积分,得到下垂系数为

$$R_{di,s}(t) = R_{di,s-1} + k_a \int_0^t I_{oi} dt \quad (0 \leq t \leq t_{s1}) \quad (16)$$

式中:  $t_{s1}$  为积分时长;  $R_{di,s}(t)$  为第  $s$  次迭代过程中的下垂系数;  $R_{di,s-1}(t)$  为第  $s-1$  次迭代输出的下垂系数。

由式(15)可得两个储能单元的下垂系数变化速率  $\dot{R}_{di}$ 、 $\dot{R}_{dj}$  分别为

$$\begin{cases} \dot{R}_{di} = k_a I_{oi} \\ \dot{R}_{dj} = k_a I_{oj} \end{cases} \quad (17)$$

如式(17)所示,两个储能单元下垂系数变化速率与该单元输出电流成正比。由前文可知,输出会随着积分时长的推进逐渐靠近平均电流,使得下垂系数变化曲线为非线性变化,因此输出电流也为非线性变化<sup>[23]</sup>,如图4所示。

母线电压恢复阶段  $[t_{s2}]$ : 在积分阶段,引入了较大的下垂系数,引起母线电压的跌落,因此有必要对母线电压进行恢复。考虑若各单元输出线路阻抗相同,则在积分阶段各单元下垂系数以相同变化速率增加,但输出电流变化不大 ( $I_{ref} \approx I'_{ref}$ ), 输出电流变化曲线可近似为线性变化。为此,在每次迭代中取积分阶段中间时刻 ( $t_{mid}$ ) 的瞬时电流 ( $I_{oi,mid,s}$ ) 取代平均输出电流 ( $I_{ref}$ ) 作为参考电流,如图5所示。其中,  $A_i$  与  $B_i$  皆为输出电流与积分阶段中间时刻瞬时电流差值的积分面积。根据图5(a),将积分阶段的输出电流积分与参考电流的积分作差<sup>[23]</sup>,可得

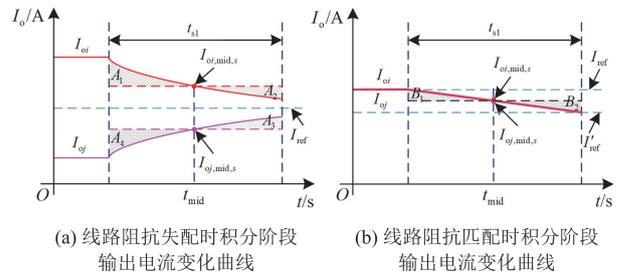
$$\Delta R_{di,s} = k_a \int_0^{t_{s1}} I_{oi} dt - k_a t_{s1} I_{oi,mid,s} = A_1 - A_2 \geq 0 \quad (18)$$

$$\Delta R_{dj,s} = k_a \int_0^{t_{s1}} I_{oj} dt - k_a t_{s1} I_{oj,mid,s} = A_3 - A_4 \leq 0 \quad (19)$$

式中:  $\Delta R_{di,s}$  和  $\Delta R_{dj,s}$  为两个储能单元在经过积分阶段和母线电压恢复阶段后的下垂系数增量。

若线路阻抗匹配,则在积分阶段的电流变化如图5(b)所示。此时有如式(20)所示关系。

$$\Delta R_{di,s} = \Delta R_{dj,s} = B_1 - B_2 = 0 \quad (20)$$



(a) 线路阻抗失配时积分阶段  
输出电流变化曲线

(b) 线路阻抗匹配时积分阶段  
输出电流变化曲线

图5 积分阶段输出电流动态变化过程

Fig. 5 Dynamic change process of output current  
in integration stage

由式(18)、式(19)可知, ESU# $i$  得到正下垂系数增量, ESU# $j$  得到负下垂系数增量, 两个单元的输出电流按照图 2(b)的动态特性逐次靠近。同时, 若参考电流在非积分中间时刻进行采样, 则无法满足式(20), 下垂系数增量无法逐渐收敛为 0。

为了避免下垂系数突变引起母线电压波动, 母线电压恢复阶段的下垂系数调整表达式为

$$R_{di,s}(t) = R_{di,s}(t_{s1}) - k_a t_{s1} I_{oi, mid,s} \frac{t - t_{s1}}{t_{s2}}, \quad t_{s1} < t \leq t_{s1} + t_{s2} \quad (21)$$

在经过积分阶段和母线电压恢复阶段后, 下垂系数调整为

$$R_{di,s} = R_{di,s-1} + \Delta R_{di,s} \quad (22)$$

判断等待阶段 $[t_{s3}]$ : 由于 ESUs 之间没有电气信息交互, 所以利用输出电流的相对变化量作为判断指标, 则第  $s$  次迭代后的输出电流相对变化量  $e_s$  表示为

$$e_s = |I_{oi,s} - I_{oi,s-1}| \quad (23)$$

如果  $e_s$  连续 3 次都小于设定阈值, 则表明该单元已经完成线路阻抗补偿, 更新本地迭代信号  $S_i$ , 由 0 置为 1。

为了验证线路阻抗迭代的收敛性, 由图 1 可得两个变换器第  $s$  次迭代后的输出电流分别为

$$\begin{cases} I_{oi,s} = \frac{v_{dc}(R_{dj,s} + r_j)}{(R_{di,s} + r_i)(R_{dj,s} + r_j) + (R_{di,s} + r_i)R_{load} + (R_{dj,s} + r_j)R_{load}} \\ I_{oj,s} = \frac{v_{dc}(R_{di,s} + r_i)}{(R_{di,s} + r_i)(R_{dj,s} + r_j) + (R_{di,s} + r_i)R_{load} + (R_{dj,s} + r_j)R_{load}} \end{cases} \quad (24)$$

在零初始下垂系数的条件下, 迭代过程中的下垂系数及其增量有如下近似关系:

$$R_{di,s} + R_{dj,s} \approx 0 \quad (25)$$

$$\Delta R_{di,s} + \Delta R_{dj,s} \approx 0 \quad (26)$$

则式(24)可改写为

$$\begin{cases} I_{oi,s} = \frac{v_{dc}(R_{dj,s} + r_j)}{R_{di,s}R_{dj,s} + r_i r_j + (r_i + r_j)R_{load}} \\ I_{oj,s} = \frac{v_{dc}(R_{di,s} + r_i)}{R_{di,s}R_{dj,s} + r_i r_j + (r_i + r_j)R_{load}} \end{cases} \quad (27)$$

同时考虑  $(r_i + r_j)R_{load} + r_i r_j \gg R_{di,s}R_{dj,s}$ , 忽略下垂系数在分母的影响, 则电流误差表示为

$$|I_{oi,s} - I_{oj,s}| = \left| \frac{v_{dc}(R_{dj,s} - R_{di,s} + r_j - r_i)}{r_i r_j + (r_i + r_j)R_{load}} \right| \quad (28)$$

根据式(22), 式(28)可改写为

$$|I_{oi,s} - I_{oj,s}| = \left| I_{oi,s-1} - I_{oj,s-1} + \frac{v_{dc}(\Delta R_{dj,s} - \Delta R_{di,s})}{r_i r_j + (r_i + r_j)R_{load}} \right| \quad (29)$$

根据式(18)、式(19)可得  $|I_{oi,s} - I_{oj,s}| \leq |I_{oi,s-1} - I_{oj,s-1}|$ , 即电流均衡误差是收敛的。

## 2.2 分布式通信

为了确保所有单元都完成了对线路阻抗补偿以及同时切换至 SoC 均衡控制, 在控制器中设置本地迭代信号  $D_i$  和全局切换信号  $D_{0i}$ 。

各单元之间采用分布式通信, 消除对全局信息的依赖, 提高系统可靠性。系统中所有储能单元组成的节点集合为  $V$ , 各单元之间的互联通信链路表示为  $E$ , 其通信网络拓扑图如图 6 所示。节点与边之间的关系可用邻接加权矩阵  $A = [a_{ij}]$  表示,  $a_{ij}$  是节点  $j$  与节点  $i$  之间信息交换的权重系数。当有  $a_{ij} = a_{ji} > 0$  时, 表示节点  $i$  与节点  $j$  进行双向通信, 交换各自的状态信息, 并通过平均动态一致性算法迭代计算全局切换信号。考虑通信的离散性, 全局切换信号可由式(30)得到。

$$D_{0i}(s+1) = D_{0i}(s) + \lambda \sum_{j \in N_i} a_{ij}(D_{0i}(s) - D_{0j}(s)) \quad (30)$$

式中:  $D_{0i}$  与  $D_{0j}$  分别为节点  $i$  和节点  $j$  的全局切换信号;  $\lambda$  为收敛速度常量;  $N_i$  为与节点  $i$  相邻节点的集合。

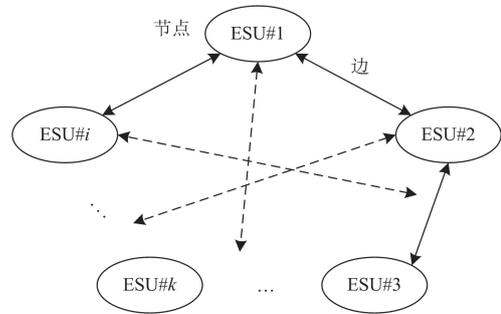


图 6 储能系统的通信网络拓扑

Fig. 6 Communication network topology of energy storage system

$D_i$  和  $D_{0i}$  初始值都设置为 0。当所有  $S_i$  都置为 1 时,  $D_{0i}$  快速收敛为 1, 所有单元切换至 SoC 均衡控制以及对当前下垂系数采样保持。

## 2.3 SoC 均衡控制

经过线路阻抗迭代矫正后, 各储能单元的线路阻抗满足如式(31)所示关系。

$$R_{d1} + r_{i1} = R_{d2} + r_{i2} = \dots = R_{ds} + r_{is} = R_d \quad (31)$$

式中:  $R_d$  为常数。

但传统下垂控制难以保证 ESUs 间的 SoC 均衡。根据式(7)可知, 调节下垂系数或参考电压可改变输出电流大小<sup>[21]</sup>, 如图 7 所示。

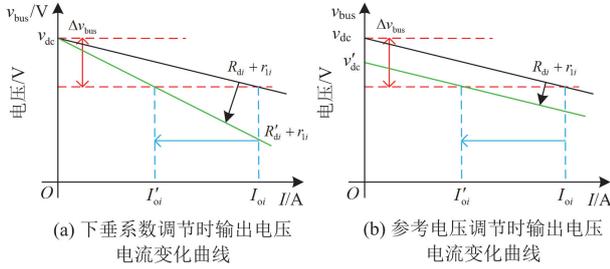


图 7 下垂曲线动态调节过程

Fig. 7 Dynamic regulation process of droop curve

本文将关联 SoC 的单调增函数加入到下垂控制参考电压中<sup>[12]</sup>, 得到基于 SoC 自适应下垂控制表达式为

$$v_{oi} = v_{dc} + V(S_{OCi}) - R_{di} I_{oi} \quad (32)$$

式中:  $V(S_{OCi})$  为第  $i$  个储能单元关联 SoC 的递增函数。结合式(2), 可得母线电压  $v_{bus}$  与输出电流  $I_{oi}$  之间的关系式如式(33)所示。

$$v_{bus} = v_{dc} + V(S_{OCi}) - (R_{di} + r_{li}) I_{oi} \quad (33)$$

基于式(33), 输出电流为

$$I_{oi} = \frac{v_{dc} + V(S_{OCi}) - v_{bus}}{R_{di} + r_{li}} \quad (34)$$

根据式(31)、式(34), ESUs 之间满足如下关系:

$$\begin{aligned} I_{o1} : I_{o2} : \dots : I_{ok} &= [v_{dc} + V(S_{OC1}) - v_{bus}] : \\ & [v_{dc} + V(S_{OC2}) - v_{bus}] : \\ & \dots : \\ & [v_{dc} + V(S_{OCk}) - v_{bus}] \end{aligned} \quad (35)$$

由上述分析可知, 变换器的输出电流与 SoC 大小成正比。即在放电工况下, 当  $S_{OCi} > S_{OCj}$  时, 有  $I_{oi} > I_{oj}$ ; 而在充电工况下, 由于电流为负值, 则有  $|I_{oi}| < |I_{oj}|$ 。各单元 SoC 以不同速率减少或增加且逐渐靠近, 最终实现负荷电流与 SoC 的均衡。

本文中单调递增函数  $V(S_{OCi})$  表达式为

$$V(S_{OCi}) = e^{kS_{OCi}^n} - \delta \quad (36)$$

式中:  $k$  为比例调节因子;  $n$  为指数调节因子;  $\delta$  为参考电压调节因子。 $k$ 、 $n$  可调节 SoC 均衡速率,  $\delta$  在  $k$  和  $n$  确定之后设置, 确保电压偏差在允许范围内。

单调函数  $V(S_{OCi})$  中的参数会影响 SoC 均衡速率, 那么根据式(6)、式(31)以及式(34), 可得 SoC 均衡误差  $\Delta S_{OC}(t)$  在时域下的表达式为

$$\begin{aligned} \Delta S_{OC}(t) &= (S_{OCi_0} - S_{OCj_0}) - \\ & \frac{k_c}{C_c} \int \left[ \frac{V[S_{OCi}(t)] - V[S_{OCj}(t)]}{R_d} \right] dt \end{aligned} \quad (37)$$

则 SoC 均衡误差在单位时间内的变化大小与两个储能单元间的  $V(S_{OCi})$  差值正相关, 而根据式(35)可知, 储能单元输出电流与  $V(S_{OCi})$  正相关。因此, 可从储能单元输出电流的差异对 SoC 均衡速率进行定量分析。

结合图 1 结构和式(31)、式(34)、式(36), 可得输出电流差异  $\Delta I_o$  为

$$\Delta I_o = \frac{[e^{kS_{OCi}^n} - e^{k(S_{OCi} - \Delta S_{OC})^n}](R_d + 2R_{load})}{R_d^2 + 2R_d R_{load}} \quad (38)$$

式中:  $\Delta S_{OC}$  表示 SoC 均衡误差, 定义为  $\Delta S_{OC} = S_{OCi} - S_{OCj}$ 。将  $S_{OCi}$  设为一个定值, 通过变动  $S_{OCj}$ , 表示 SoC 误差大小。

依据式(38)绘制不同  $S_{OCi}$  初始值以及不同 SoC 误差条件下, 调节因子对储能单元输出电流差异的影响, 如图 8 所示。由图 8(a)和图 8(c)可知,  $k$  值越大, 输出电流差异也会随之增大, 根据式(37), SoC 均衡误差在单位时间内的变化量越大, 系统到达 SoC 均衡点所需时间也就越短, 从而提高了 SoC 的均衡速率。由图 8(b)和图 8(d)可知, 在 SoC 初始值较大时,  $n$  越大, 输出电流差异越大; 而在 SoC 初始值较小时,  $n$  越小, 输出电流差异越大, 从而提高了 SoC 均衡速率。

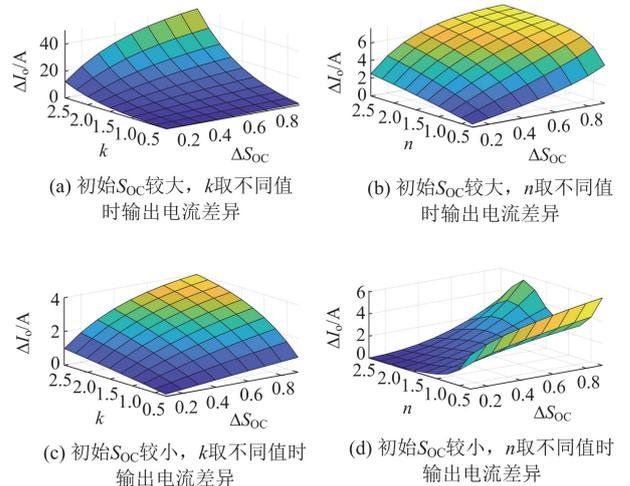


图 8 不同初始  $S_{OC}$  和  $\Delta S_{OC}$  误差条件下, 调节因子对输出电流差异的影响

Fig. 8 Influence of tuning factor on output current difference in different initial  $S_{OC}$  and  $\Delta S_{OC}$  error conditions

## 2.4 参数约束原则

线路阻抗迭代控制中, 母线电压变化最大值出

现在积分阶段结束时, 需将其限制在偏差允许范围内。根据式(2)、式(16)可对  $V_{\text{vir}}$  进行量化处理。

$$V_{\text{vir}} \leq \Delta v_{\text{bus,max}} - r_{\text{li}} I_{\text{oi,max}} \quad (39)$$

式中:  $\Delta v_{\text{bus,max}}$  为母线电压最大偏差;  $I_{\text{oi,max}}$  为储能变换器可输出的最大电流。

单次迭代中下垂系数增加引起的最大压降为

$$V_{\text{vir,max}} = k_a I_{\text{ref}} \int_0^{t_{s1}} I_{\text{oi}} dt \quad (40)$$

积分阶段开启前有  $I_{\text{oi,max}} \leq I_{\text{ref}}$ , 由图 5 可得迭代参数  $k_a$  与  $t_{s1}$  需满足如下关系式:

$$V_{\text{vir,max}} \leq \frac{3k_a t_{s1} I_{\text{ref}}^2}{2} \leq \Delta v_{\text{bus,max}} - r_{\text{li}} I_{\text{oi,max}} \quad (41)$$

其中, 式(41)为充分条件。  $I_{\text{ref}}$  对  $V_{\text{vir}}$  的影响更大, 因此, 一般情况下, 其值可取功率变换器或储能单元的最大充放电电流。参数  $k_a$  与补偿速度有关, 参数  $t_{s1}$  与  $I_{\text{oi,mid,k}}$  的采样精度有关, 二者对  $V_{\text{vir}}$  的影响相似。参数设置时可先对  $k_a$  进行设置, 再依据式(41)对  $t_{s1}$  进行确定。另外, 母线电压恢复时间  $t_{s2}$  和判断等待时间  $t_{s3}$  的取值没有限制, 小于积分阶段时间  $t_{s1}$  即可。

SoC 均衡控制中, 单调增函数  $V(S_{\text{OCi}})$  可能造成母线电压偏差过大。需要选取合适的调节因子, 保证直流母线的电压偏差在允许范围内, 如式(42)所示。

$$-\mu\%v_{\text{dc}} \leq V(S_{\text{OCi}}) \leq \mu\%v_{\text{dc}} \quad (42)$$

式中:  $\mu\%$  为直流母线电压偏差的允许值。

根据图 8 可知, 调节因子以及  $\Delta S_{\text{OC}}$  会影响输出电流差异, 过大的电流差异会导致储能系统出现环流甚至造成变换器过载。根据式(35), 各单元在 SoC 均衡控制的初始输出电流近似为

$$I_{\text{oi}_0} \approx \frac{v_{\text{dc}} + V(S_{\text{OCi}_0}) - v_{\text{bus}}}{\sum [v_{\text{dc}} + V(S_{\text{OCi}_0}) - v_{\text{bus}}]} I_{\text{load}} \quad (43)$$

式中:  $I_{\text{oi}_0}$  为 SoC 均衡控制阶段的初始输出电流;

$I_{\text{load}}$  为 ESUs 的输出电流总和。在实际应用中, 通常在控制器中对电感电流最大值进行限制, 确保输出电流不超过功率变换器的输出功率上限以及电源的最大充放电电流。

### 3 系统稳定性分析

前文中, 已对迭代过程收敛性进行证明, 表明在迭代过程中系统是稳定收敛的。下文对 SoC 均衡过程的稳定性进行分析。表 1 为直流微电网稳定性分析时所用的系统参数。

以图 1 结构的放电工况为例, 两个储能单元的输出电流可表示为

表 1 直流微电网稳定性分析相关参数

Table 1 Parameters related to stability analysis of DC microgrid

参数	取值
$S_{\text{OCi}}$ 初始值 $S_{\text{OCi}_0}$	0.5
$S_{\text{OCj}}$ 初始值 $S_{\text{OCj}_0}$	0.9~0.1
低通滤波器截止频率 $\omega_c/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	20~100
变换器输入电压 $v_{\text{in}}/\text{V}$	20
母线电压额定值 $v_{\text{dc}}/\text{V}$	48
线路阻抗 $r_{\text{li}}/\Omega$	0.1
线路阻抗 $r_{\text{lj}}/\Omega$	0.35
负载电阻 $R_{\text{load}}/\Omega$	24

$$\begin{cases} \hat{i}_{\text{oi}} = \alpha_i v_{\text{oi}} - \lambda v_{\text{oj}} \\ \hat{i}_{\text{oj}} = \alpha_j v_{\text{oj}} - \lambda v_{\text{oi}} \end{cases} \quad (44)$$

其中

$$\begin{cases} \alpha_i = \frac{r_{\text{lj}} + R_{\text{load}}}{r_{\text{li}} r_{\text{lj}} + r_{\text{li}} R_{\text{load}} + r_{\text{lj}} R_{\text{load}}} \\ \alpha_j = \frac{r_{\text{li}} + R_{\text{load}}}{r_{\text{li}} r_{\text{lj}} + r_{\text{li}} R_{\text{load}} + r_{\text{lj}} R_{\text{load}}} \\ \lambda = \frac{R_{\text{load}}}{r_{\text{li}} r_{\text{lj}} + r_{\text{li}} R_{\text{load}} + r_{\text{lj}} R_{\text{load}}} \end{cases} \quad (45)$$

对式(6)进行小信号扰动, 可得

$$\hat{S}_{\text{OCi}} = -\frac{k_c}{s C_e} \hat{i}_{\text{oi}} \quad (46)$$

在下垂控制的使用中, 通常会加入低通滤波器, 则有

$$\hat{I}_{\text{oi}} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \hat{i}_{\text{oi}} \quad (47)$$

式中:  $\omega_c$  为低通滤波器的截止频率。

根据式(32), 可得 SoC 均衡过程的下垂控制表达式为

$$\begin{cases} v_{\text{oi}} = v_{\text{dc}} + V(S_{\text{OCi}}) - R_{\text{di}} I_{\text{oi}} \\ v_{\text{oj}} = v_{\text{dc}} + V(S_{\text{OCj}}) - R_{\text{dj}} I_{\text{oj}} \end{cases} \quad (48)$$

将式(36)代入式(48)中并进行小信号扰动, 得

$$\begin{cases} \hat{v}_{\text{oi}} = kn \hat{S}_{\text{OCi}} S_{\text{OCi}}^{n-1} e^{kS_{\text{OCi}}} - R_{\text{di}} \hat{I}_{\text{oi}} \\ \hat{v}_{\text{oj}} = kn \hat{S}_{\text{OCj}} S_{\text{OCj}}^{n-1} e^{kS_{\text{OCj}}} - R_{\text{dj}} \hat{I}_{\text{oj}} \end{cases} \quad (49)$$

为简化表达式, 令

$$S_{\text{OCii}}^{n-1} = S_{\text{OCi}}^{n-1} e^{kS_{\text{OCi}}} \quad (50)$$

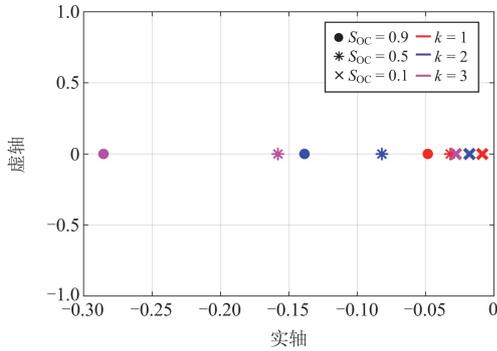
对式(44)进行小信号扰动并联立式(45)一式(47)、式(49)以及式(50), 可得系统特征方程为

$$b_0 s^4 + b_1 s^3 + b_2 s^2 + b_3 s + b_4 = 0 \quad (51)$$

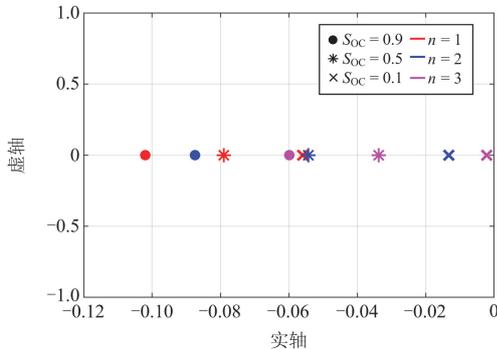
其中, 各项系数分别为

$$\left\{ \begin{array}{l} b_0 = C_c^2 \\ b_1 = 2C_c^2\omega_c + C_c^2\omega_c(\alpha_i R_{di} + \alpha_j R_{dj}) + \\ \quad knk_c C_c(\alpha_i S_{OCii}^{n-1} + \alpha_j S_{OCij}^{n-1}) \\ b_2 = C_c^2\omega_c^2 + C_c^2\omega_c^2(\alpha_i R_{di} + \alpha_j R_{dj}) + \\ \quad 2knk_c C_c\omega_c(\alpha_i S_{OCii}^{n-1} + \alpha_j S_{OCij}^{n-1}) + \\ \quad C_c^2\omega_c^2 R_{di} R_{dj}(\alpha_i \alpha_j - \lambda^2) + k^2 n^2 k_c^2 S_{OCii}^{n-1} S_{OCij}^{n-1} + \\ \quad knk_c C_c\omega_c(\alpha_i \alpha_j - \lambda^2)(R_{dj} S_{OCii}^{n-1} + R_{di} S_{OCij}^{n-1}) \\ b_3 = knk_c C_c\omega_c^2(\alpha_i S_{OCii}^{n-1} + \alpha_j S_{OCij}^{n-1}) + \\ \quad 2k^2 n^2 k_c^2 \omega_c(\alpha_i \alpha_j - \lambda^2) S_{OCii}^{n-1} S_{OCij}^{n-1} + \\ \quad knk_c C_c\omega_c^2(\alpha_i \alpha_j - \lambda^2)(R_{dj} S_{OCii}^{n-1} + R_{di} S_{OCij}^{n-1}) \\ b_4 = k^2 n^2 k_c^2 \omega_c^2(\alpha_i \alpha_j - \lambda^2) S_{OCii}^{n-1} S_{OCij}^{n-1} \end{array} \right.$$

由于 ESU 之间互为等价关系, 则可将  $S_{OCi}$  的取值固定, 将  $S_{OCj}$  在合理范围内进行变动, 那么根据表 1 与式(51)绘制 SoC 均衡阶段闭环极点图, 如图 9 所示。其中, 不同颜色的标记表示不同的调节因子取值; 不同样式的标记表示  $S_{OCj}$  取值为 0.9、0.5 及 0.1 时的主导极点。



(a)  $n$  保持不变,  $k$  取不同值



(b)  $k$  保持不变,  $n$  取不同值

图 9 在不同调节因子下  $S_{OC}$  取不同值时的极点分布图

Fig. 9 Pole distribution diagram when  $S_{OC}$  is taken different values under different adjustment factors

由图 9 可知, SoC 取值越小, 系统主导极点越靠近虚轴, 这是由 SoC 减小导致参考电压降低所引起, 但系统主导极点始终在左半平面内, 保证了系统的稳定运行。此外, 由图 9(a)可知, SoC 取值相同时, 随着  $k$  值的增大, 主导极点逐渐远离虚轴, 系统的稳定性增加。但根据式(36)可知, 过大的  $k$  值会造成母线电压较大的偏差; 而根据图 9(b)可知, SoC 取值相同时, 随着  $n$  值的增大, 主导极点逐渐靠近虚轴, 系统的稳定性下降。因此,  $k$ 、 $n$  的取值不宜过大。

## 4 实验验证

为验证所提控制策略, 本文搭建由 3 个储能单元以及一个光伏单元组成的硬件实验平台, 如图 10 所示。平台参数为: 直流母线电压  $v_{bus} = 48 \text{ V}$ ; ESUs 规格为  $21 \text{ V}/1.2 \text{ Ah}$ , 通过储能变换器并联在母线上; 在实验中, 光伏输出功率保持不变, 视为恒功率源, 由可编程电源模拟。不匹配线路阻抗由 3 个阻值不同的电阻模拟。

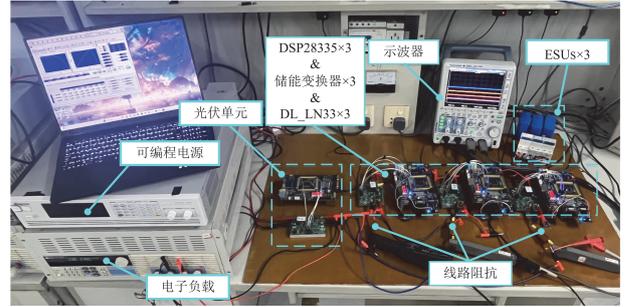


图 10 直流微电网硬件实验平台

Fig. 10 Hardware experimental platform for DC microgrid

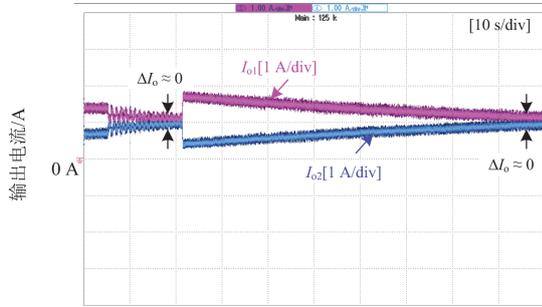
控制策略由 DSP28335 以及 DL\_LN33 共同实现。SoC 初始值由开路电压法进行估算; 在实验过程中, 用时安法对 SoC 进行实时估计。SoC 数据由 DSP 采集, 并绘制点线图。

### 4.1 放电实验

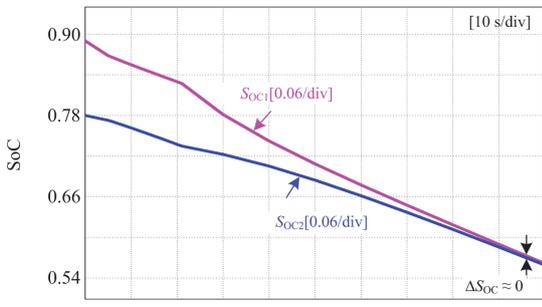
当负载功率大于光伏单元输出功率时, 储能系统提供差额功率。SoC 初始值为:  $S_{OC1_0} = 0.89$ 、 $S_{OC2_0} = 0.78$ ; 根据选取原则, 迭代参数统一选取为:  $k_a = 2.5$ 、 $t_{s1} = 0.5 \text{ s}$ 、 $t_{s2} = 0.2 \text{ s}$ 、 $t_{s3} = 0.3 \text{ s}$ ;  $V(S_{OCi})$  的参数选取:  $n = 2$ 、 $k = 1$ 、 $\delta = 2$ , 实验波形如图 11 所示。

由图 11 可知, 系统在初始阶段工作在传统下垂控制策略下, 由于两个储能单元之间的线路阻抗不一致, 负荷电流不平衡。在 5 s, 系统工作状态切换至迭代补偿控制, 动态地调整下垂系数, 消除不匹配线路阻抗对系统的影响, 实现负荷平衡, 在该过程中, 下垂系数不断变化调节, 引起电流与母线电

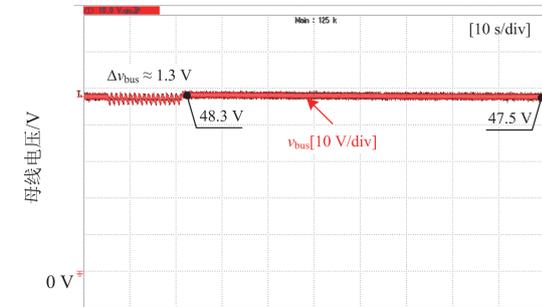
压的小幅度波动，但在参数选取的限制下，电压始终在允许范围内；在 21 s，各单元切换至 SoC 均衡控制，根据 SoC 自适应地调节输出电流，实现 SoC 均衡，避免储能单元过放。



(a)



(b)



(c)

图 11 放电过程实验波形

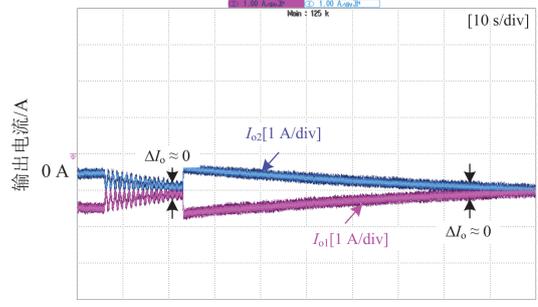
Fig. 11 Experimental waveform of discharging process

#### 4.2 充电实验

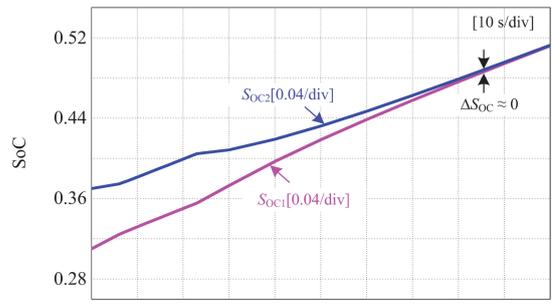
当负载功率小于光伏单元输出功率时，储能系统消纳差额功率。SoC 初始值为： $S_{OC1\_0} = 0.31$ 、 $S_{OC2\_0} = 0.37$ ； $V(S_{OCi})$  的参数为： $n = 0.5$ 、 $k = 1.5$ 、 $\delta = 3$ ，实验波形如图 12 所示。

由图 12 可知，系统在初始阶段工作在传统下垂控制策略下。6 s 左右，系统工作状态切换至迭代控制，对线路阻抗进行补偿，消除了不匹配线路阻抗

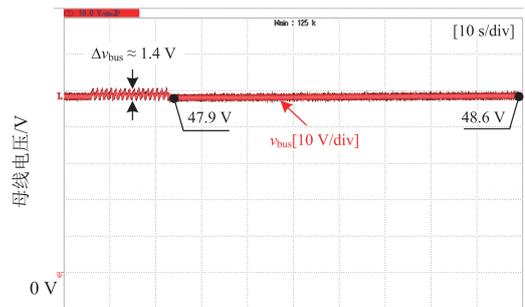
的影响，可以看出由于输出电流为负值，而下垂系数为正，电压波动的方向与放电过程相反；在 23 s 左右，系统切换至 SoC 均衡控制，各单元根据本地 SoC 信息自适应地调节输出电流，实现 SoC 均衡，避免了过充。在系统整体运行过程中，母线电压偏差始终在允许范围内。



(a)



(b)



(c)

图 12 充电过程实验波形

Fig. 12 Experimental waveform of charging process

#### 4.3 多储能实验

为验证分布式通信以及平均一致性算法的可行性，搭建 3 个储能单元并联放电。SoC 初始值为： $S_{OC1\_0} = 0.88$ 、 $S_{OC2\_0} = 0.79$ 、 $S_{OC3\_0} = 0.91$ 。 $V(S_{OCi})$  参数与放电实验一致，实验波形如图 13 所示。

由图 13 可知，在采用传统下垂控制策略时，由

于线路阻抗不一致, 系统的负荷电流不平衡。通过迭代补偿控制, 所提控制策略逐渐消除了线路阻抗不匹配对系统的影响, 实现负荷平衡; 在 28 s 左右, 系统切换至 SoC 均衡控制。各单元根据本地 SoC 信息自适应地调节输出电流, 平衡各储能单元之间的 SoC。相比于 2 个储能单元, 3 个储能单元组成的储能系统迭代过程更为复杂, 因此迭代过程所需的时间更多。实验结果表明该策略在多个储能单元组成的储能系统依旧可行。

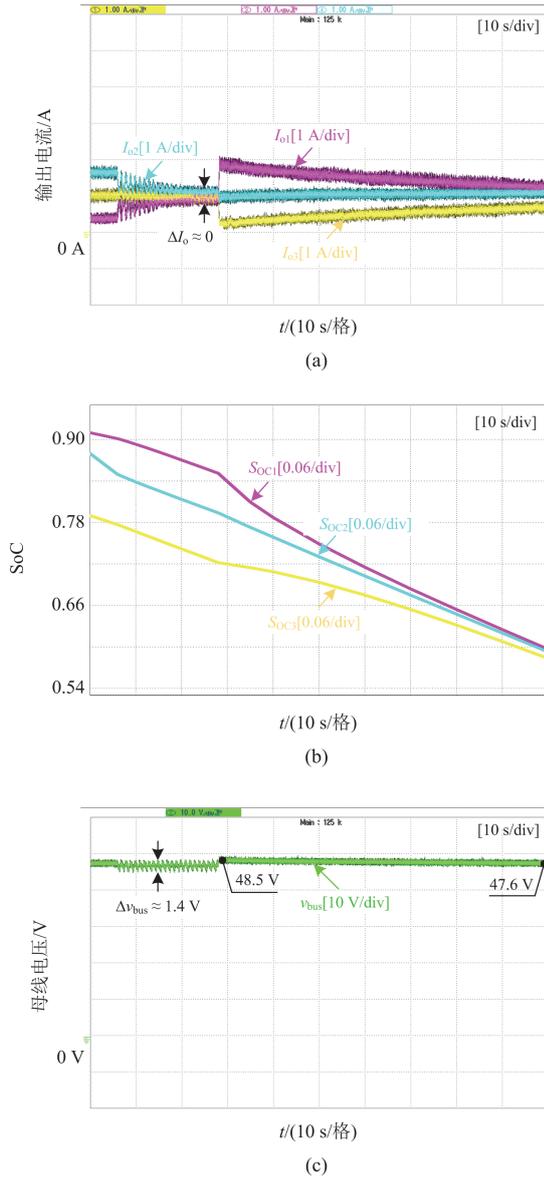


图 13 多储能放电实验波形

Fig. 13 Experimental waveform of multi-energy storage discharging

## 5 总结

本文针对直流微电网中不匹配线路阻抗的情

况, 提出了一种基于线路阻抗逐次补偿的直流微电网分布式储能自适应均衡控制策略, 理论分析以及实验结果如下:

1) 所提控制方案相比于传统虚拟阻抗调节法, 无需平均电流信息, 也无需电压信息通信, 且母线电压偏差在允许范围的前提下, 实现对线路阻抗的补偿以及 SoC 均衡。

2) 在两段控制中间加入切换信号, 并通过低带宽通信下的一致性算法, 实现控制的切换。该信号为一个数字信号, 无实际物理意义, 降低了通信量。

3) 基于硬件实验平台, 通过放电、充电以及多储能实验, 验证所提控制策略的可行性。

## 参考文献

- [1] 宁显华, 潘欢, 李峰, 等. 基于线路电阻观测值的直流微电网改进下垂控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 42-51.  
NING Xianhua, PAN Huan, LI Feng, et al. An improved droop control strategy for a DC microgrid based on line resistance observations[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 42-51.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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 Boxu, CUI Wei, CHEN Yu, 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.
- [5] 薛花, 张珂宁, 王凯, 等. 基于能量函数塑形的直流微电网多电力弹簧电压平稳控制方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(10): 96-108.  
XUE Hua, ZHANG Kening, WANG Kai, et al. Voltage regulation control method of multiple electric springs in DC microgrid based on energy function shaping[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(10): 96-108.
- [6] 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 Xinrui, CAO Hanlin, LAN Liangsheng, 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.
- [7] 代广贵, 何晋, 张博嘉. 考虑不同容量的储能 SOC 均衡与功率分配策略[J]. *电力建设*, 2023, 44(6): 12-22.  
DAI Guanggui, HE Jin, ZHANG Bojia. SOC balancing and power distribution strategies considering different capacities of energy storage[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(6): 12-22.
- [8] 米阳, 钱翌明, 张浩杰, 等. 考虑通信异常的直流微电网储能单元分布式协调控制研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(13): 50-59.  
MI Yang, QIAN Yiming, ZHANG Haojie, et al. Distributed coordinated control of a DC microgrid energy storage unit considering abnormal communication[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(13): 50-59.
- [9] HAN W, ZOU C, ZHOU C, et al. Estimation of cell SOC evolution and system performance in module-based battery charge equalization systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(5): 4717-4728.
- [10] LU X, SUN K, GUERRERO J M, et al. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(6): 2804-2815.
- [11] 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*, 2015, 6(1): 147-157.
- [12] 方炜, 齐楠, 仇锐, 等. 低压直流微电网的改进 SoC 均衡控制研究[J]. *电子科技大学学报*, 2021, 50(6): 947-953.  
FANG Wei, QI Nan, QIU Rui, et al. An improved SoC balance control method for low-voltage DC microgrids[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2021, 50(6): 947-953.
- [13] GU J, YANG X, ZHANG Y, et al. Fuzzy droop control for SOC balance and stability analysis of DC microgrid with distributed energy storage systems[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2024, 12(4): 1203-1216.
- [14] ZHI N, DING K, DU L, et al. An SOC-based virtual DC machine control for distributed storage systems in DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, 35(3): 1411-1420.
- [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 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.
- [16] 米阳, 蔡杭谊, 宋根新, 等. 考虑不匹配线阻的分布式储能单元荷电状态均衡研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(15): 4441-4451.  
MI Yang, CAI Hangyi, SONG Genxin, et al. State-of-charge balancing research of distributed energy storage units with unmatched line impedance[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(15): 4441-4451.
- [17] 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*, 2022, 10(1): 455-468.
- [18] 米阳, 蔡杭谊, 袁明瀚, 等. 直流微电网分布式储能系统电流负荷动态分配方法[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(10): 17-23.  
MI Yang, CAI Hangyi, YUAN Minghan, et al. Dynamic distribution method of current load for distributed energy storage system in DC microgrid[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(10): 17-23.
- [19] 卢志刚, 苗泽裕, 蔡瑶. 考虑时变线阻的多储能 SOC 稳定均衡控制策略[J]. *高电压技术*, 2024, 50(1): 127-137.  
LU Zhigang, MIAO Zeyu, CAI Yao. Stable equilibrium control strategy for multi-energy storage SOC considering time-varying linear resistance[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(1): 127-137.
- [20] SILVA W W A G, OLIVEIRA T R, DONOSO-GARCIA P F. An improved voltage-shifting strategy to attain concomitant accurate power sharing and voltage restoration in droop-controlled DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(2): 2396-2406.
- [21] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术研究综述[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.
- [22] HUANG B, ZHENG S, WANG R, et al. Distributed optimal control of DC microgrid considering balance of charge state[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2022, 37(3): 2162-2174.
- [23] 李慧平, 丁万龙, 赵建丽, 等. 高等数学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2022.

收稿日期: 2024-11-11; 修回日期: 2025-01-19

作者简介:

方 炜(1977—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为直流微电网与开关功率变换技术; E-mail: fangwei@ahut.edu.cn

周 密(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流微电网分布式储能协调控制。E-mail: zhoumi@ahut.edu.cn

(编辑 魏小丽)