

• 机械电子工程 •

# 低压直流微电网的改进 SoC 均衡控制研究



方 炜\*, 齐 楠, 仇 锐, 刘晓东, 刘宿城

(安徽工业大学电力电子与运动控制省重点实验室 安徽 马鞍山 243032)

**【摘要】** 低压直流微电网是实现终端用户负荷直流化的一种重要形态, 为了解决其中各储能单元荷电状态 (SoC) 不一致问题, 提出了改进 SoC 均衡控制策略。该策略可同时实现储能单元充电和放电过程中的 SoC 均衡和负载电流分配, 并将母线电压偏差控制在较小范围内。同时控制系统无需进行输出电流采样与互联互通, 可有效降低设计成本。其次提出了曲线法分析系统动态特性, 并基于小信号模型对系统进行稳定性分析。最后搭建硬件实验平台, 验证了该控制策略的正确性及可行性。

**关键词** 自适应下垂控制; 直流微电网; 储能系统; 负载电流分配; SoC 均衡  
**中图分类号** TM727 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2021092

## An Improved SoC Balance Control Method for Low-Voltage DC Microgrids

FANG Wei\*, QI Nan, QIU Rui, LIU Xiaodong, and LIU Sucheng

(Key Lab of Power Electronics & Motion Control, Anhui University of Technology Maanshan Anhui 243032)

**Abstract** The low-voltage DC microgrid is an important form of smart power supply system to realize the DC load of terminal users. In order to solve the problem of inconsistent state of charge (SoC) of each energy storage unit in DC microgrids, an improved SoC balancing method is proposed for low-voltage DC microgrids on the customer side. The method can realize SoC balancing and load current sharing in both charging and discharging process, while the bus voltage deviation can be in a small range. Meanwhile, the control system does not need the output current sampling and interconnection communication among each energy storage unit, which reduces the design cost of the system. Secondly, the curve method is proposed to analyze the dynamic characteristics of the system operation process according to the curve characteristics of SoC function, and the system stability analysis is given based on the small signal model. Finally, the hardware experimental platform is built to verify the correctness and feasibility of the proposed method.

**Key words** adaptive droop control; DC microgrids; energy storage system; load current sharing; SoC balancing

随着能源与负荷“即插即用”需求的与日俱增、终端用户负荷直流化趋势明显, 直流微电网逐渐成为能源生产消费和技术变革的一项重要支撑<sup>[1-2]</sup>。其中, 低压直流微电网的研究与应用展现出巨大的潜力和市场<sup>[3]</sup>。

为满足系统的稳定运行、增大容量配置<sup>[4]</sup>, 储能系统 (energy storage system, ESS) 中各储能单元 (energy storage units, ESUs) 通常以分布式结构并联接入直流母线<sup>[5]</sup>。但是随着多个储能单元的接入, 各单元之间荷电状态 (state of charge, SoC) 的不一

致将会造成储能单元过度充放电及频繁投切, 严重影响到储能元件的使用寿命以及系统的稳定性<sup>[6]</sup>。

文献 [7] 利用 SoC 的不断变化实时改变下垂系数, 实现各储能单元放电过程 SoC 以及负荷功率的动态均衡。文献 [8] 对此做出了进一步展开, 将 SoC 的  $n$  次方分别应用在下垂系数的分子和分母中, 实现 ESUs 在充放电两种模式下动态均衡, 但是控制器中需要选择两种不同的下垂表达式分别控制 ESUs 的充电和放电过程。文献 [9] 将 ESUs 的 SoC 平均值加入下垂系数中, 进而达到 SoC 均衡

收稿日期: 2021-04-09; 修回日期: 2021-06-29

基金项目: 安徽省自然科学基金 (1708085ME106); 安徽高校自然科学研究重点项目 (KJ2019A0066)

作者简介: 方炜 (1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力电子功率变换及非线性控制的研究。

\*通信作者: 方炜, E-mail: fangwei@ahut.edu.cn

的目的。但加入 SoC 后的下垂系数较大，导致过大的母线电压偏差<sup>[10]</sup>。文献 [11] 把与 SoC 相关的算法引入下垂控制的参考电压中实现对 SoC 均衡速度的控制。而文献 [12] 提出的控制方案，能够对低压直流微电网实现高精度、无电压偏差的 SoC 均衡目标，但提高了系统的通信压力，且控制器过于复杂提高了其设计成本。

为此，本文提出了一种适用于用户侧低压直流微电网的改进下垂控制策略。本控制方案可以同时用于储能系统的充电和放电过程，不需要采样储能单元的输出电流，降低设计难度的同时，可有效降低母线电压偏差范围；且各储能之间不存在互联互通，降低系统的整体通信压力。其次，依据 SoC 函数的曲线变化特性提出了曲线法分析系统的动态特性，基于小信号模型分析了系统的稳定性，并由此给出设计参数的选取原则。最后，搭建了基于系统的多储能单元并联的微电网硬件实验平台，通过实验验证所提理论的合理性和有效性。

## 1 控制模型及运行方式分析

### 1.1 下垂控制的运行方式

直流微电网中 ESUs 传统下垂控制可表达为：

$$V_{o_i}^* = v_{dc} - R_{d_i} I_{o_i} \quad (1)$$

式中， $V_{o_i}^*$ 、 $R_{d_i}$ 、 $I_{o_i}$  分别代表第  $i$  个变换器 ( $i=1,2,\dots,n$ ) 的输出电压参考、下垂系数和输出电流； $v_{dc}$  为给定初始电压，通常为直流母线的额定电压<sup>[13]</sup>。

以两个分布式储能单元并联运行的直流微电网为例，图 1 为加入下垂控制后的储能系统等效模型。

等效电路中， $V_{bus}$  代表母线电压； $r_{n1}$  和  $r_{n2}$  表示两台变换器输出端口到母线公共点的线路电阻； $V_{o1}$  和  $V_{o2}$  为采用下垂控制后各变换器的实际输出电压。因此可推得母线电压  $V_{bus}$  与输出电流之间的关系：

$$V_{bus} = v_{dc} - (R_{d_i} + r_{i_i}) I_{o_i} \quad (2)$$

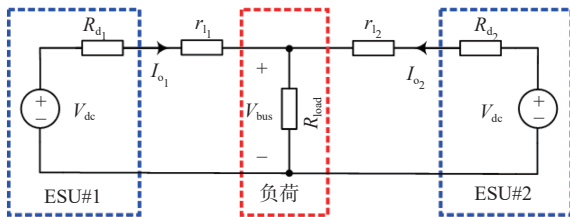


图 1 储能系统等效电路

根据上式所述，母线电压与输出电流、下垂系数之间的动态调节关系如图 2 所示。图 2a 和图 2b

分别表示下垂系数和参考电压变化时，系统中负荷电流及输出电压出现的改变，利用这一特性，储能系统可实现对系统负荷的自主分配<sup>[14-15]</sup>。

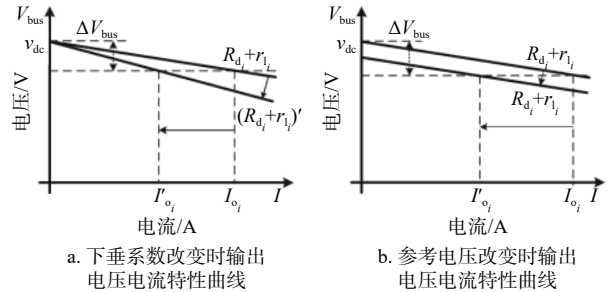


图 2 下垂曲线的动态调整过程

### 1.2 基于 SoC 均衡的改进控制方案

本文以用户侧的低压直流微电网为应用对象，以 SoC 均衡为控制目标，提出了改进控制方案，如图 3 所示，该方案无需各单元之间的互联互通及输出电流采样，简化了控制器设计，且能有效地改善母线电压偏差。

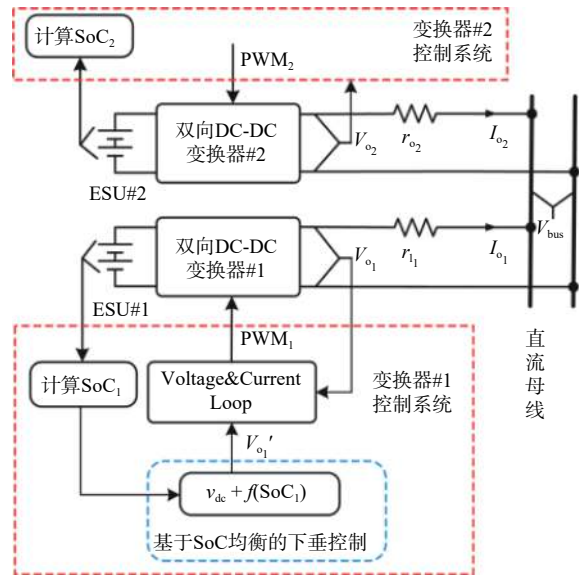


图 3 基于 SoC 均衡改进下垂控制的系统整体结构

储能单元常用的 SoC 计算方式为：

$$SoC_i = SoC_{i_0} - \frac{1}{C_e} \int I_{bat_i} dt \quad (3)$$

式中， $I_{bat_i}$  为 ESU#i 的输出电流； $SoC_{i_0}$  为 ESUs 的初始容量； $C_e$  为各 ESU 的额定容量。

改进方案中下垂表达式为：

$$V_{o_i}^* = v_{dc} + f(SoC_i) \quad (4)$$

式中， $V_{o_i}$  为第  $i$  个接口变换器的输出电压参考值；

$f(\text{SoC})$  是一类单调递增函数, 可通过自变量 SoC 的实时调节各变换器输出电压参考, 实现对各储能单元的 SoC 均衡和负荷电流分配。

结合式 (2), 母线电压  $V_{\text{bus}}$  与变换器输出电流  $I_o$ 、线路电阻  $r_i$  之间的关系表达式为:

$$V_{\text{bus}} = v_{\text{dc}} + f(\text{SoC}_i) - r_i I_{o_i} \quad (5)$$

根据图 1, 两个变换器输出电流表达式为:

$$I_{o_1} = \frac{v_{\text{dc}} + f(\text{SoC}_1) - V_{\text{bus}}}{r_1} \quad (6)$$

$$I_{o_2} = \frac{v_{\text{dc}} + f(\text{SoC}_2) - V_{\text{bus}}}{r_2} \quad (7)$$

考虑到各接口变换器输电线缆的阻值近似且远小于负载阻值, 进一步假设  $r_1=r_2=r_1$ , 则有:

$$\frac{I_{o_1}}{I_{o_2}} = \frac{v_{\text{dc}} + f(\text{SoC}_1) - V_{\text{bus}}}{v_{\text{dc}} + f(\text{SoC}_2) - V_{\text{bus}}} \quad (8)$$

由式 (8) 可得, 变换器的输出电流与其储能单元的 SoC 值呈正比关系。故在放电过程中, SoC 较大的 ESU 提供较多的负荷电流, 而 SoC 较小的 ESU 提供较小的负荷电流。充电过程则相反, 最终 ESUs 之间的 SoC 和电流趋于一致, 达成 SoC 均衡及负荷电流合理分配目标。

## 2 系统的动态性能及稳定性分析

### 2.1 曲线法分析系统动态特性

根据式 (6)~式 (9), 函数  $f(\text{SoC})$  与输出电流、SoC 的变化率有直接关联。故提出一种曲线法, 直观地分析运行过程中系统的 SoC 均衡速率。

本文采用的函数  $f(\text{SoC})$  表达式为:

$$f(\text{SoC}) = k(e^{\text{SoC}^n} - 1) - \delta \quad (9)$$

式中,  $k$  和  $n$  分别为比例系数和自变量 SoC 的指数系数, 作为调节因子来调节 SoC 的均衡速率;  $\delta$  的取值与函数值域相关, 在控制器中作为母线电压偏差调节因子, 可控制母线电压偏差范围。为保持 ESUs 输出电压恒定, SoC 的取值范围可限制在 10%~90%。

图 4 分别分析了  $k$  和  $n$  取值不同时,  $f(\text{SoC})$  的曲线变化率。由图 4a 所示, 保持  $n$  不变, 随着  $k$  值的增大,  $f(\text{SoC})$  的曲线变化率明显增大, 系统将会获得更快的均衡速率。由图 4b 所示, 保持

$k$  不变, SoC 取值较大时, 曲线变化率都随着  $n$  的增大而增大, 系统有更快的均衡速率; 相反, 当 SoC 取值较小时, 曲线变化率会随  $n$  的增大而变低, 相应均衡速率也会降低。

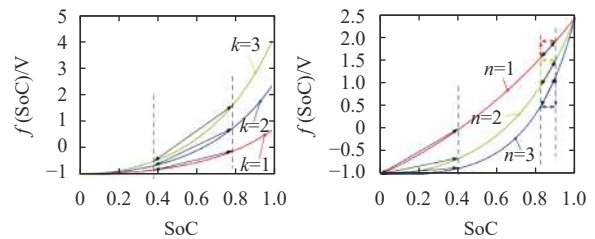


图 4 不同调节因子所对应的曲线变化率

进一步, 由式 (5) 可得母线电压与函数  $f(\text{SoC})$  的关系, 若忽略线路电阻引起的少量压降,  $f(\text{SoC})$  取值即可近似为母线电压偏差,  $f(\text{SoC})$  的值域即为母线电压的偏差范围。图 5 比较了  $\delta$  取值不同时的函数曲线, 调节因子  $\delta$  取值不同时, 对应  $f(\text{SoC})$  值各不相同, 即母线电压偏差范围。

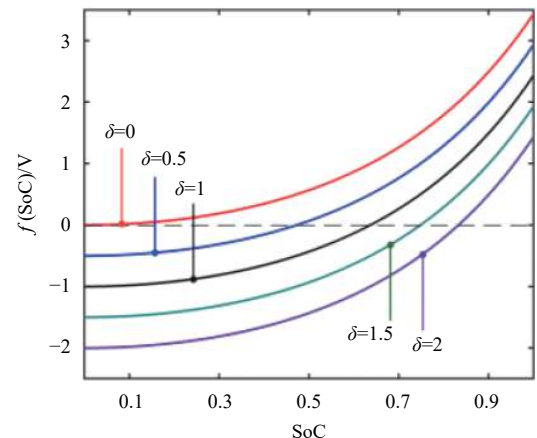


图 5 不同  $\delta$  取值时的母线电压偏差分布

根据上述曲线法的分析, 只需保证控制器中选取的函数  $f(\text{SoC})$  曲线特性合理, 即可达到控制均衡速率和改善母线电压偏差的目的。

### 2.2 稳定性分析

对式 (3) 进行小信号扰动, 得:

$$\hat{\text{SoC}}_i = -\frac{1}{sC_e} \hat{i}_{\text{bat}_i} \quad (10)$$

式中, 变换器的输入电流  $I_{\text{bat}_i}$  和输出电流  $I_{o_i}$  之间的比例关系可写为:

$$I_{\text{bat}_i} = \eta I_{o_i} \quad (11)$$

对式 (5) 和式 (9) 联立后进行小信号扰动, 可得:

$$\hat{v}_{\text{bus}} = -kn\text{SoC}^{n-1} \hat{\text{SoC}}_i - r_i \hat{i}_{o_i} \quad (12)$$

将式 (10) 和式 (11) 代入式 (12), 有:

$$\hat{v}_{\text{bus}} = -(kn\text{SoC}^{n-1} \frac{\eta}{sC_e} + r_i) \hat{i}_{o_i} \quad (13)$$

ESUs 在放电过程中, 能量流动方式可简化为:

$$I_{o_1} + I_{o_2} = \frac{V_{\text{bus}}}{R_{\text{load}}} \quad (14)$$

式中,  $R_{\text{load}}$  视为系统放电过程中的等效负载。

相应的, ESUs 在充电过程中, 能量流动过程的稳态可以依据文献 [16] 分析:

$$I_{o_1} + I_{o_2} + \frac{V_{\text{bus}}}{R'} = I_{\text{cps}} \quad (15)$$

$$I_{\text{cps}} = -\frac{P_{\text{cps}}}{v_{\text{bus\_op}}^2} V_{\text{bus}} + \frac{P_{\text{cps}}}{v_{\text{bus\_op}}} \quad (16)$$

式中,  $I_{\text{cps}}$  为系统向 ESUs 充电的恒功率源输出电流;  $P_{\text{cps}}$  为恒功率源的输出功率大小, 在稳态条件下可视为常数;  $v_{\text{bus\_op}}$  为母线电压额定值;  $R'$  为系统的实际负载大小, 取正值。

联立式 (15) 和式 (16) 可得:

$$I_{o_1} + I_{o_2} = -\left(\frac{P_{\text{cps}}}{v_{\text{bus\_op}}^2} + \frac{1}{R'}\right) V_{\text{bus}} + \frac{P_{\text{cps}}}{v_{\text{bus\_op}}} \quad (17)$$

为了化简表达式, 可设:

$$\frac{P_{\text{cps}}}{v_{\text{bus\_op}}^2} + \frac{1}{R'} = -\frac{1}{R_{\text{load}}} \quad (18)$$

得化简后的充电过程能量流动表达式:

$$I_{o_1} + I_{o_2} = \frac{V_{\text{bus}}}{R_{\text{load}}} + \frac{P_{\text{cps}}}{v_{\text{bus\_op}}} \quad (19)$$

式中,  $R_{\text{load}}$  同放电过程一样, 可视为系统在充电过程中的等效负载。需要指出的一点是, 系统在放电过程中, 等效负载  $R_{\text{load}}$  取正值, 而在充电过程中, 等效负载  $R_{\text{load}}$  取负值。

式 (14)、式 (19) 进行小信号扰动后均可得到:

$$\hat{i}_{o_1} + \hat{i}_{o_2} = \frac{\hat{v}_{\text{bus}}}{R_{\text{load}}} \quad (20)$$

联立式 (13) 和式 (20), 可得系统的特征方程:

$$As^2 + Bs + C = 0 \quad (21)$$

式中,  $A = (r_1^2 + 2r_1\eta R_{\text{load}})C_e^2$ ;  $B = kn(\text{SoC}_1^{n-1} + \text{SoC}_2^{n-1})(r_1 + \eta R_{\text{load}})C_e$ ;  $C = k^2 n^2 \text{SoC}_1^{n-1} \text{SoC}_2^{n-1}$ 。

由于系统 ESUs 之间为相互等价, 如图 6 所示保持  $\text{SoC}_1$  不变的同时, 绘制  $\text{SoC}_2$  在合理范围内变化的根轨迹图, 以对所提控制策略进行稳定性分析。用于计算的系统参数选择如表 1 所示。

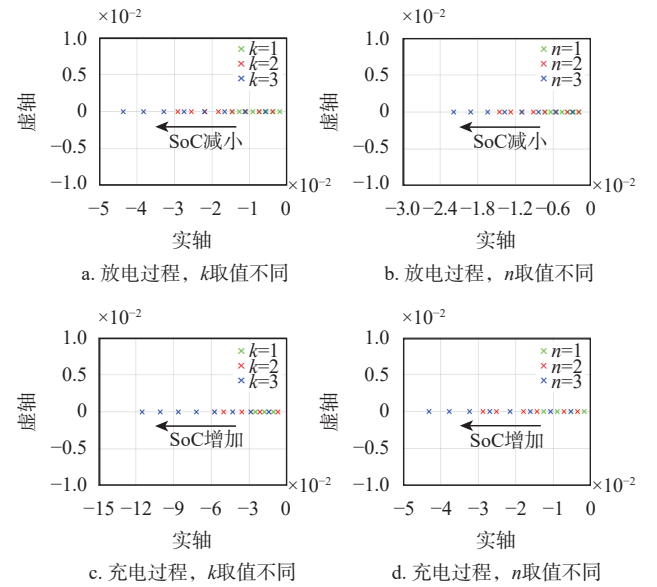


图 6 调节因子不同和 SoC 变化情况下的根轨迹分布

表 1 直流微电网系统相关参数

参数	取值
SoC <sub>1</sub> 初始值SoC <sub>1,0</sub>	0.75
SoC <sub>2</sub> 初始值SoC <sub>2,0</sub>	0.1~0.9
ESUs中各变换器输入电压V <sub>in</sub> /V	20
母线电压额定值v <sub>dc</sub> /V	48
线路电阻r <sub>l</sub> /Ω	0.2

图 6 绘制了调节因子取值不相同情况下  $\text{SoC}_2$  变化时的根轨迹图。不同颜色标记代表着调节因子的不同取值, 相同颜色标记了  $\text{SoC}$  变化情况下的闭环主导极点。系统的主导极点均分布在  $s$  域的左半部, 系统的稳定性得到保证。

### 2.3 控制系统设计规则

在所提改进控制系统的应用设计过程中, 相关约束条件及参数的选取需从以下方面具体考虑。

1) 参数选取: 对于初始  $\text{SoC}$  较大的情况, 控制系统中可以取较大的  $n$  和  $k$  加速  $\text{SoC}$  均衡; 对于初始  $\text{SoC}$  较小的情况, 可以选择较小的  $n$  和较大的  $k$  以提高均衡速率。

2) 约束条件 1:  $f(\text{SoC})$  中 3 个调节因子的变动, 可能会造成母线电压偏差过大。结合曲线法初步预估母线电压的偏差范围, 适当调节  $f(\text{SoC})$  的曲线特性, 确保系统在运行中母线电压始终在最大允许范围内波动, 同时由式 (5) 量化  $f(\text{SoC})$  的取值范围:

$$f(\text{SoC}_i) \leq \Delta v_{\text{busmax}} + r_1 I_{i\text{max}} \quad (22)$$

式中,  $I_{i\text{max}}$  为接口变换器实际过程中可流过的最大电流;  $\Delta v_{\text{busmax}}$  为最大直流母线偏差。

3) 约束条件 2: 在设计过程中, 控制系统中  $f(\text{SoC})$  还受最大充放电电流及接口变换器的功率等级限定。根据式 (8) 输出电流与  $f(\text{SoC})$  的关系, 可表达为:

$$I_{O_{i,0}} \approx \frac{f(\text{SoC}_{i,0}) + v_{\text{err}}}{\sum [f(\text{SoC}_{i,0}) + v_{\text{err}}]} |I_{\text{load}}| \quad (23)$$

式中,  $I_{\text{load}}$  为流过储能系统的最大输出 (输出) 电流值;  $v_{\text{err}}$  为直流母线偏差。以此量化参数作为参考, 在实际设计中, 保证输出电流不高于最大功率限制和充放电电流限制即可满足参数选取要求。

### 3 实验验证

硬件实验平台如图 7 所示。为了提高实验效率缩短实验时间, 选择了两组 21 V/1.6 Ah 规格的小容量锂电池组, 并依据电池组规格匹配了额定功率为 200 W 的双向 Buck/Boost 变换器; 光伏阵列由可编程电源模拟, 接变换器实现 MPPT 运行。控制策略均由 TI\_DSP28335 数字控制器实现, 储能单元控制器对电感电流的限幅范围将设置在  $-3.5 \sim 8$  A。锂电池组的 SoC 采用开路电压法结合安时积分法对进行在线估算, 由 DSP 记录所得 SoC 数据, 绘制点线图作为 SoC 的最终实验结果。

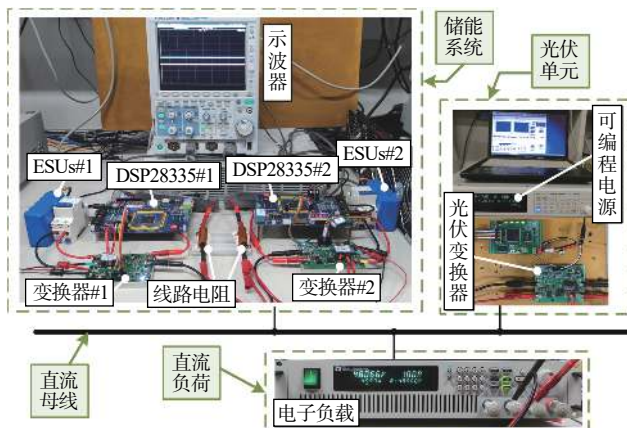


图 7 带有储能系统的实验平台

### 3.1 放电实验

当光伏单元的输出功率不足以满足负荷需求时, 储能单元工作在放电模式下向负载供电。初始  $\text{SoC}_{1,0}=0.9$ ,  $\text{SoC}_{2,0}=0.8$ ; 锂电池放电电流不超过 8 A, 折算至输出电流  $I_o$  最大值不超过 3.3 A。故根据选取原则,  $k=2$ ,  $n=1$ ,  $\delta=1$ , 实验波形如图 8 所示。

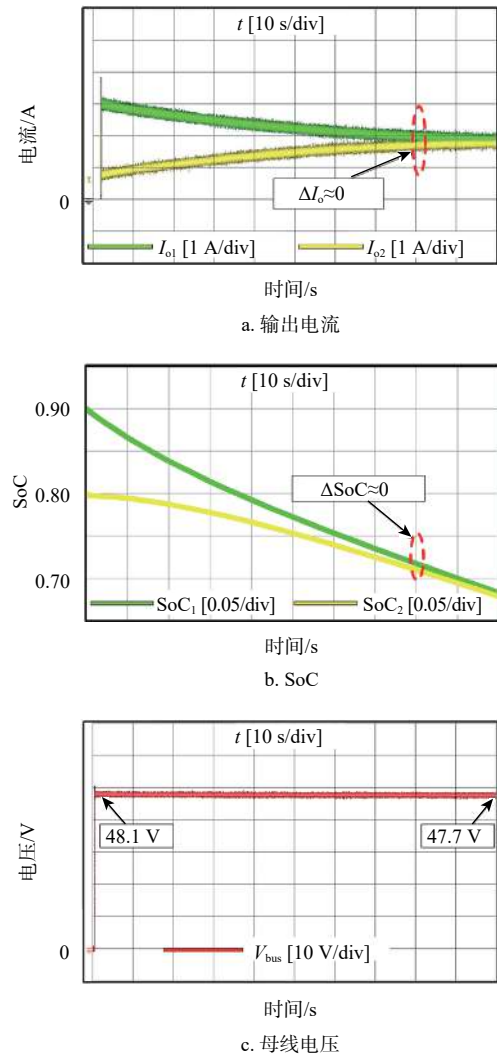


图 8 放电过程实验波形

图中的各储能单元均衡前, SoC 初始值较大的 ESU#1 输出电流大于 ESU#2 的输出电流,  $\text{SoC}_1$  的下降速度明显快于  $\text{SoC}_2$  的下降速度。随着系统的运行, 各单元输出电流  $I_o$  和 SoC 逐渐趋于一致, 约 80 s 时刻实现储能系统输出电流均衡分配及 SoC 均衡。系统整体运行过程中, 母线电压偏差约 0.4 V, 说明所提策略可有效控制母线电压偏差。

### 3.2 充电实验

当光伏单元的输出功率多于负荷需求时, 储能单元工作在充电模式下吸收多余的电能。初始  $\text{SoC}_{1,0}=0.35$ ,  $\text{SoC}_{2,0}=0.30$ , 低压侧锂电池充电电

流不超过 3.6 A，折算在变换器高压侧电流不超过约 1.8 A。根据选取原则， $k=1$ ， $n=1.5$ ， $\delta=1$ ，实验波形如图 9 所示。图中，SoC 较小的 ESU#2 吸收的电流明显大于 ESU#1 吸收的电流，同样，ESU#2 中 SoC 上升速率明显快于 ESU#1。随着系统的运行至 100 s 时刻，两个储能单元之间的 SoC 差值逐渐减小，负荷电流也逐渐趋于一致。同时，图 9c 所示的母线电压也无明显偏差，说明在充电过程中，所提策略依然可有效控制母线电压偏差。所提改进控制策略的有效性得以验证。

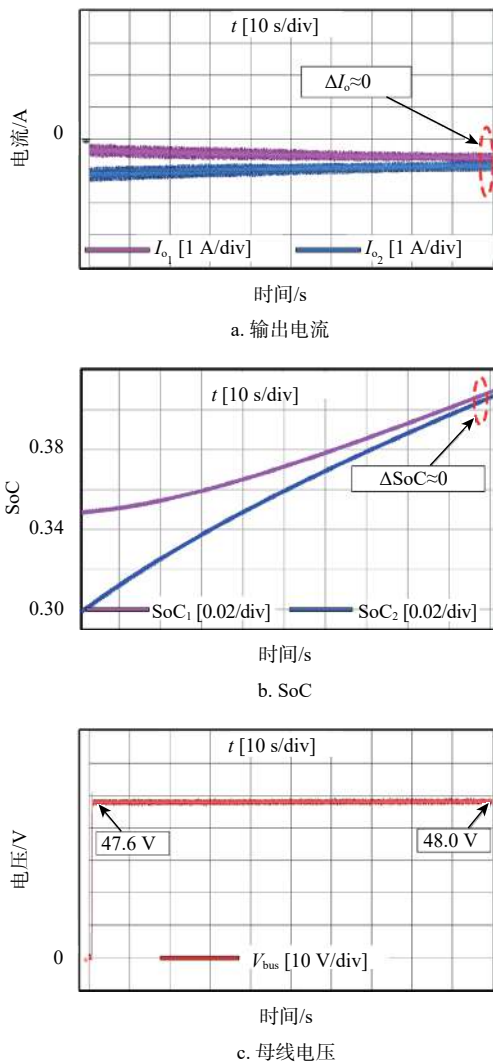


图 9 充电过程实验波形

### 3.3 负载跳变实验

图 10 模拟了放电过程中的负载跳变情况，负载跳变 1 由 4 A 减小为 2 A，输出电流和 SoC 变化率均减小，但 SoC 较高的 ESU#1 输出电流依然大于 ESU#2 的输出电流；负载跳变 2 时刻负载电流恢复，储能单元输出电流增大。整个过程中，各单

元输出电流及 SoC 变化趋势并未发生变化，随着系统的运行最终均趋于一致。

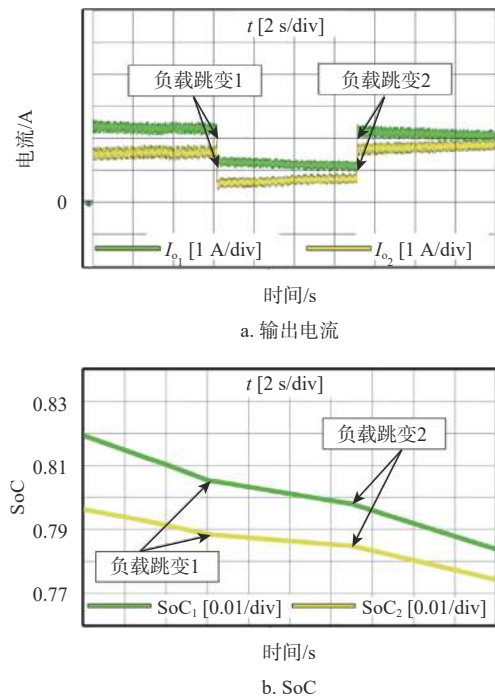


图 10 储能系统放电跳变实验波形

图 11 为系统充电过程中负载功率突变的实验波形。与放电过程相似，储能系统的充电电流出现变化后，各储能单元重新分配负荷电流，SoC 的变换率也出现相应改变，并最终趋于一致，实现了储能单元间的 SoC 均衡控制。

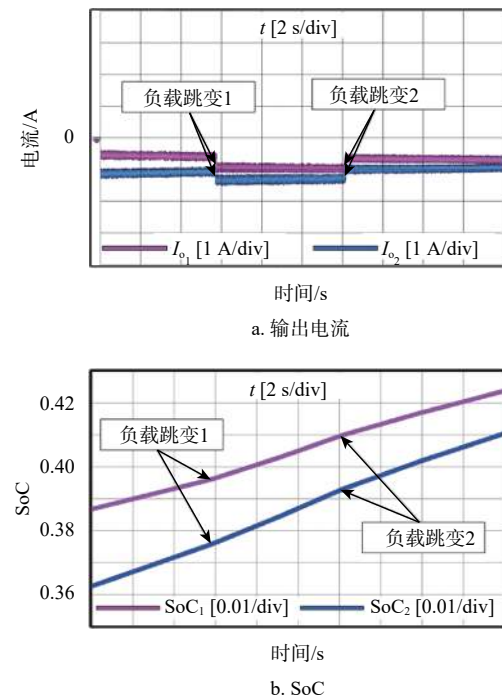


图 11 储能系统充电跳变实验波形

## 4 结束语

本文针对适用于用户侧的低压直流微电网系统的多储能单元 SoC 状态不一致问题, 提出了改进的自适应下垂控制策略; 同时应用曲线法分析系统在该控制策略下的动态特性, 并据此给出控制器参数的设计思路。理论分析以及最终的实验结果表明:

1) 所提改进控制方案以保证较小的母线电压偏差为前提, 可以同时实现系统充电和放电工作过程的 SoC 均衡;

2) 在用户侧低压直流供电系统运行效果基本不受影响的前提下, 控制器的设计中省略了对输出电流的采样以及各储能单元之间的互联通信, 可以有效降低系统控制器的设计难度和设计成本。

### 参 考 文 献

- [1] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2-17.  
LI X L, GUO L, WANG C S, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [2] VUYURU, U MAITI, S CHAKRABORTY C. Active power flow control between DC Microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5712-5723.
- [3] AUGUSTINES, MISHRA M K, LAKSHMINARASAMMA N. Adaptive droop control strategy for load sharing and circulating current minimization in low-voltage standalone DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(1): 132-141.
- [4] 刘子文, 苗世洪, 范志华, 等. 基于自适应下垂特性的孤立直流微电网功率精确分配与电压无偏差控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 795-806.  
LIU Z W, MIAO S H, FAN Z H, et al. Accurate power allocation and zero steady-state error voltage control of the islanding DC microgrid based on adaptive droop characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 795-806.
- [5] LIU S, LIU R, ZHENG J, et al. Predictive function control in tertiary level for power flow management of DC microgrid clusters[J]. Electronics Letters, 2020, 56(13): 675-676.
- [6] MEMG L, SHAIEE Q, TRECATE G F, et al. Review on control of DC microgrids and multiple microgrid clusters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 5(3): 928-948.
- [7] 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, 2015, 61(6): 2804-2815.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] SAEED P, POOYA D, HOSSEIN M, et al. Synchronverter-enabled DC power sharing approach for LVDC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10): 8089-8099.
- [11] 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, 2019, 34(1): 130-138.
- [12] HOANG K, LEE 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.
- [13] 杨捷, 金新民, 吴学智, 等. 一种适用于直流微电网的改进型电流负荷分配控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 59-67.  
YANG J, JIN X M, WU X Z, et al. An improved load current sharing control method in DC micro-grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 59-67.
- [14] TAH A, DAS D. An enhanced droop control method for accurate load sharing and voltage improvement of isolated and interconnected DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1194-1204.
- [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 S S, WANG F, GUO H, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 72-84.
- [16] HAN R, TUCCI M, MARTINELLI A, et al. Stability analysis of primary plug-and-play and secondary leader-based controllers for DC microgrid clusters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 1780-1800.

编辑 刘飞阳