

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200734

# 基于 SOC 下垂控制的独立直流微电网协调控制策略研究

张良<sup>1</sup>, 闫凯宏<sup>1</sup>, 冷祥彪<sup>2</sup>, 吕玲<sup>1</sup>, 蔡国伟<sup>1</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 南方电网能源发展研究院有限责任公司, 广东 广州 510670)

**摘要:** 储能系统(ESS)作为独立直流微电网的关键组成部分, 其主要由多组储能单元(ESUs)组成。针对多组 ESUs 荷电状态(SOC)均衡速度较慢, 在 SOC 均衡过程中会产生母线电压偏差问题, 提出一种改进 SOC 下垂控制策略。首先, 该控制策略根据各储能单元(ESU)的充放电状态和 SOC 值寻找最优下垂曲线, 合理分配负荷功率, 减小母线电压偏差。然后通过确定主储能单元进行功率再分配, 并在允许范围内动态调整下垂系数, 使系统快速收敛到均衡状态, 进一步减小该过程中产生的母线电压偏差。此外, 考虑当 ESS 因满充等原因退出运行时, ESS 稳压变为光伏系统稳压, 光伏系统由变步长 MPPT 控制切换为带有前馈补偿的下垂控制, 确保母线电压稳定和微电网安全运行。最后利用 Matlab/Simulink 搭建仿真模型, 仿真结果表明所提控制策略可在保证 SOC 快速均衡的前提下, 减小母线电压偏差, 维持独立直流微电网的稳定运行。

**关键词:** 直流微电网; 协调控制; 幂指数下垂控制; 电压前馈补偿; 荷电状态; 直流母线电压

## Research on coordinated control strategy of an autonomous DC microgrid based on SOC droop control

ZHANG Liang<sup>1</sup>, YAN Kaihong<sup>1</sup>, LENG Xiangbiao<sup>2</sup>, LÜ Ling<sup>1</sup>, CAI Guowei<sup>1</sup>

(1. School of Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. China Southern Power Grid Energy Development Research Institute Company Limited, Guangzhou 510670, China)

**Abstract:** As a key component of the autonomous DC microgrid, the Energy Storage System (ESS) is mainly composed of multiple Energy Storage Units (ESUs). There is a problem in that the State-Of-Charge (SOC) equalization speed of multiple ESUs is slow, and a large bus voltage deviation will be generated during the SOC equalization process. Here we propose an improved SOC droop control strategy. First, the control strategy determines the optimal droop curve according to the charging and discharging state of each Energy Storage Unit (ESU) and the SOC value, distributes the load power reasonably, and reduces the bus voltage deviation. Then, by determining the main energy storage unit for power redistribution, and dynamically adjusting the droop coefficient within the allowable range, the system quickly converges to an equilibrium state, and the bus voltage deviation generated by this process is reduced. In addition, when the ESS is out of operation, the photovoltaic system stabilizes bus voltage, and the photovoltaic system is switched from variable step MPPT control to droop control with feedforward compensation to ensure bus voltage stability and safe operation of the microgrid. Finally, the simulation results in Matlab software indicate that the proposed control strategy can reduce the bus voltage deviation and maintain the stable operation of the autonomous DC microgrid while ensuring the rapid equilibrium of the SOC.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51607031) and the Science and Technology Innovation and Development Program of Jilin City (No. 20190104138).

**Key words:** DC microgrid; coordinated control; power index droop control; voltage feedforward compensation; state-of-charge; DC bus voltage

## 0 引言

如今, 分布式发电技术因其高能源利用率、低

污染等特点受到人们广泛关注<sup>[1-2]</sup>。但分布式电源如果直接连接电网, 将对电网的安全运行产生一定程度的影响, 为解决上述问题, 微电网的概念应运而生。与交流微电网相比, 直流微电网因其结构简化、能量转换环节少、无需考虑无功功率和谐波等优越性<sup>[3-4]</sup>受到广泛研究。直流微电网的研究要点是如何

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51607031); 吉林市科技创新发展计划项目资助(20190104138)

维持直流母线电压的稳定性<sup>[5-6]</sup>，由于可再生能源的不确定性和负荷需求的波动性，需要配置 ESS 来维持母线电压稳定<sup>[7]</sup>，ESS 主要由多组 ESUs 组成<sup>[8]</sup>，当多组 ESUs 并联时，若 ESUs 间功率分配不合理，则会导致某些 ESUs 深度放电或过度充电，从而退出运行<sup>[9-10]</sup>。一般下垂控制可用于负荷功率分配，但在传统下垂控制中，下垂系数为固定值，储能电池的充电功率和放电功率恒定，难以实现功率合理分配以及 SOC 均衡。

为此，文献[11-14]提出基于 SOC 改进下垂控制策略，但只讨论 ESS 放电时 SOC 均衡情况，并未对其充电时 SOC 均衡情况进行分析。

文献[8]提出了一种自适应分级协调控制策略，在 ESS 充电和放电的过程中，ESUs 之间功率都可按照各自 SOC 进行分配，但下垂系数随 SOC 的线性函数进行变化，SOC 变化速度较慢，无法快速达到 SOC 均衡。

文献[15-16]采用改进的 SOC 幂函数下垂控制策略，充电时下垂系数  $m_p$  与  $SOC^n$  成正比，放电时  $m_p$  与  $SOC^n$  成反比， $n$  越大，SOC 均衡速度越快，但均分精度较低，电压偏差大。

文献[17]采用 SOC 指数函数下垂控制策略，充电时下垂系数  $k_d$  与  $\exp[p(SOC-A_{soc})]$  成正比，放电时下垂系数  $k_d$  与  $\exp[p(SOC-A_{soc})]$  成反比， $p$  越大，均衡速度越快，但均分精度较低。

文献[18]根据文献[15-17]提出 SOC 幂指数下垂控制策略，同时考虑了 SOC 均衡速度和均分精度，但未考虑减小该过程产生的母线电压偏差。除此之外， $A_{soc}$  的确定需要辅助控制层完成，增加了系统复杂性。

基于以上分析，为了实现负荷功率的快速合理分配，减小功率调整时产生的直流母线电压偏差<sup>[19]</sup>，并降低系统的复杂性，本文提出一种基于 SOC 幂指数下垂控制的直流微电网协调控制策略。首先对 SOC 幂指数下垂控制中下垂系数调整方法进行改进，起到合理分配负荷功率，减小母线电压偏差，降低系统复杂性的目的，然后将需要最大功率充电或放电的 ESU 设置为主储能单元，其他 ESUs 追随主储能单元的 SOC 变化，达到负荷功率再分配和 SOC 快速均衡的目的，同时使 ESUs 的下垂系数趋于  $R_{dmin}$ ，进一步减小母线电压偏差。此外，考虑当 ESS 因满充等原因退出运行时，光伏系统由变步长 MPPT 控制切换至改进下垂控制进行稳压，保证直流母线电压的稳定性。仿真验证了所提控制策略的有效性。

### 1 直流微电网的结构及工作模式

本文研究的独立直流微电网的结构如图 1 所示，主要包含光伏系统、ESS 和交直流负荷等<sup>[20-21]</sup>。

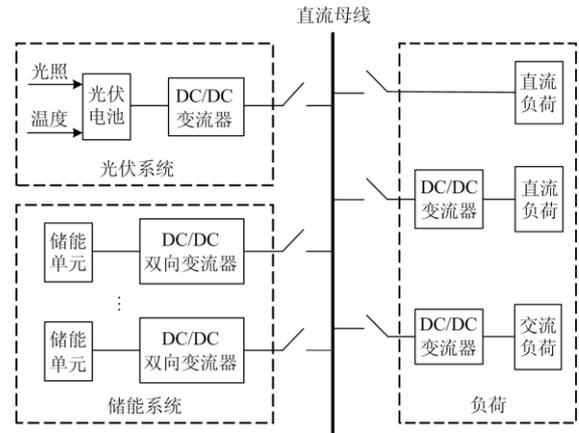


图 1 直流微电网结构

Fig. 1 Structure of DC microgrid

根据稳定直流母线电压系统的不同，将独立直流微电网分为 ESS 稳压模式(模式 1)和光伏系统稳压模式(模式 2)。

通常，储能电池的容量需限制在一定范围内，本文设定为 20%~90%<sup>[22]</sup>，即储能单元 SOC 最小值  $SOC_{min}=20%$ ，储能单元 SOC 最大值  $SOC_{max}=90%$ 。

模式 1: 当  $20\% \leq SOC \leq 90\%$  时，ESS 正常运行，采用下垂控制稳压，为了最大化利用资源，光伏系统采用变步长 MPPT 控制，系统处于模式 1。当  $P_{ESS}>0$ ，且  $SOC<20\%$ ，采取切除非重要负荷措施。

模式 2: 当  $P_{ESS}<0$ ，且  $SOC>90\%$  时，系统切换至模式 2，ESS 退出运行，光伏系统采用带有前馈补偿的下垂控制稳压，具体工作逻辑图如图 2 所示。

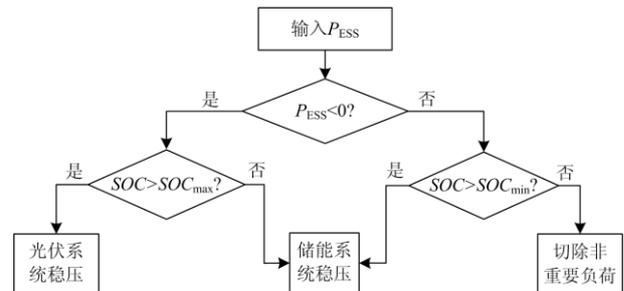


图 2 独立直流微电网工作逻辑图

Fig. 2 Logic diagram of autonomous DC microgrid

通常情况下，系统运行在 ESS 稳压模式，只有当 ESS 处于充电状态且储能容量超过 90% 时，系统切换至光伏系统稳压模式，ESS 进入闲置状态。

## 2 直流微电网控制系统

### 2.1 光伏系统运行及控制

本文光伏系统采用变步长 MPPT 控制和带有电压前馈补偿的下垂控制两种控制方式。控制原理图如图 3 所示,  $U_{PV}$  为光伏电池输出电压;  $i_{PV}$  为光伏电池输出电流;  $U_{dc}$  为直流母线电压;  $i_s$  为光伏单元输出电流。

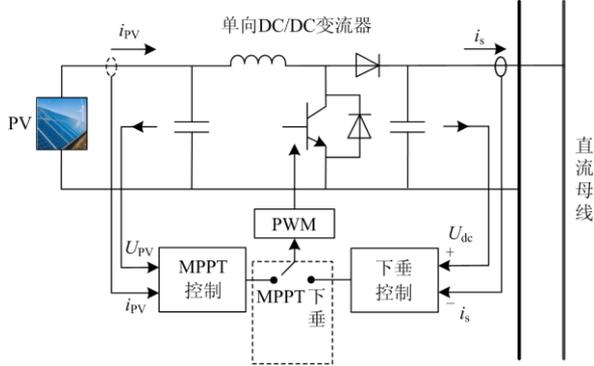


图 3 光伏系统控制原理

Fig. 3 Control principle of photovoltaic system

#### 2.1.1 变步长 MPPT 控制

为了避免受到固定扰动步长  $\Delta U_{PV}$  的影响, 快速适应变换的环境, 本文采用变步长 MPPT 控制, 引入时变因子  $\alpha$ , 将光伏电池输出功率差值  $\Delta P$  通过指数函数  $1 - \exp(-\|\Delta P\|^2)$  映射为  $\alpha$  的值。实现远离最大功率点(MPP)时  $\Delta U_{PV}$  变大, 接近 MPP 时  $\Delta U_{PV}$  变小, 提高收敛速度和稳定性<sup>[23]</sup>, 具体流程如图 4 所示。

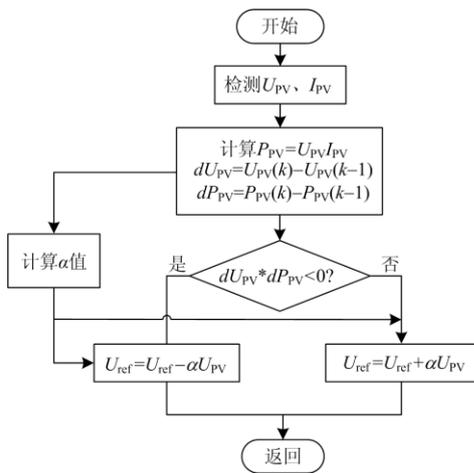


图 4 变步长 MPPT 控制流程图

Fig. 4 Variable-step MPPT control flow chart

#### 2.1.2 带有电压前馈补偿的下垂控制

若 ESS 退出运行, 光伏系统采用带有电压前馈

补偿的下垂控制, 光伏发电系统下垂特性<sup>[24]</sup>为

$$U_{dc} = U^* - i_s r \quad (1)$$

式中:  $U^*$  表示母线电压设定的期望值;  $r$  为下垂系数。

如图 5 所示, 在传统下垂控制中增加电压前馈补偿控制, 具体地, 先将  $U_{dc}$  与  $U^*$  进行比较, 接着通过 PI 控制器输出补偿量  $\Delta U^*$ , 对  $U^*$  进行动态补偿, 然后在下垂控制的参与下, 送入电压电流双环控制, 最后产生相应的 PWM 信号。

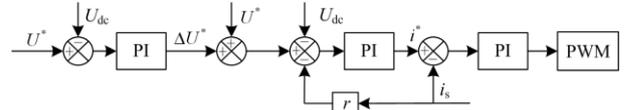


图 5 带有电压前馈补偿的光伏单元下垂控制

Fig. 5 Droop control of photovoltaic unit with voltage feed-forward compensation

由图 5 可得

$$U_{dc} = U^* - i_s r + (k_p + \frac{k_i}{s})(U^* - U_{dc}) \quad (2)$$

式中,  $k_p$  和  $k_i$  分别为前馈补偿控制器中 PI 控制器的参数。

### 2.2 改进的储能系统控制策略

文献[18]在 ESU 充放电过程中采用 SOC 幂指数下垂控制策略, 本文对其控制策略进行改进, 并且在 ESUs 中设置主储能单元, 在保证负荷功率合理分配, SOC 快速均衡的前提下, 减小了母线电压偏差。

传统储能系统  $I-U$  下垂控制表达式为

$$U_{dci} = U^* - R_{di} i_{dci} \quad (3)$$

式中,  $i_{dci}$ 、 $R_{di}$  和  $U_{dci}$  分别表示第  $i$  个 ESU 的输出电流、下垂系数和输出电压。

在小型的独立直流微电网中, 各单元之间的线损很小, 可忽略不计<sup>[25]</sup>, 所以假定各电压下垂控制环具有相同的输出电压, 由此可得

$$U_{dcm} \approx U_{dcn} \quad (4)$$

式中,  $U_{dcm}$  和  $U_{dcn}$  分别为任意两组储能单元  $ESU_m$ 、 $ESU_n$  的输出电压。联立式(3)和式(4)得

$$P_m R_{dm} = P_n R_{dn} \quad (5)$$

式中:  $P_m$  和  $P_n$  分别为  $ESU_m$  和  $ESU_n$  的输出功率;  $R_{dm}$  和  $R_{dn}$  分别为  $ESU_m$  和  $ESU_n$  下垂控制器的下垂系数。由式(5)可知, 各 ESU 的输出功率与其下垂控制器的下垂系数成反比, 传统下垂控制中下垂系数为固定值, 所以采用传统下垂控制无法根据各 ESU 的 SOC 自动分配负荷功率, 实现 SOC 均衡。若想实现这一目的, 当 ESS 充电时, 应将较小的下垂系数分配给 SOC 较低的 ESU, 使其吸收功率较

大, 充电速度较快。相反, 当 ESS 放电时, 应将较小的下垂系数分配给 SOC 较高的 ESU, 使其较快放电。

据此, 文献[18]采用的下垂系数调整方法如公式(6)所示。

$$R(SOC) = \begin{cases} k_D \exp[p(SOC^n - A_{SOC}^n)], & i_{dc} < 0 \\ k_D \exp[-p(SOC^n - A_{SOC}^n)], & i_{dc} > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $k_D$  为下垂系数参考值;  $p$  为收敛因子;  $A_{SOC}^n$  为平均荷电量, 当  $k_D = 2.5$ 、 $p = 5$ 、 $n = 2$  时功率分配效果最好<sup>[18]</sup>。

通过此下垂系数调整方法虽然可以提高 SOC 均衡速度和均分精度, 但  $A_{SOC}$  的求解需依赖辅助控制层, 增加了系统复杂性, 并且未能有效减小电压波动, 提高系统稳定性。

为此, 本文提出改进的 SOC 幂指数下垂控制策略。

由式(3)可得

$$\Delta U = U^* - U_{dci} = R_{di} i_{dci} \quad (7)$$

当  $\Delta U < 0$  时, ESU 处于充电状态,  $\Delta U > 0$  时, ESU 处于放电状态, 且  $\Delta U$  随  $R_{di}$  的变化而变化。

第  $i$  个 ESU 的初始下垂系数  $R_{di}(0)$  设置如下:

$$R_{di}(0) = \begin{cases} k_D \exp[p(SOC_i^n - SOC_{max}^n)] & \Delta U < 0 \\ k_D \exp[-p(SOC_i^n - SOC_{min}^n)] & \Delta U > 0 \end{cases} \quad (8)$$

在式(6)中, 充电时, 若 ESU 的  $SOC > A_{SOC}$ , 则  $R(SOC) > k_D$ , 若  $SOC < A_{SOC}$ , 则  $R(SOC) < k_D$ 。放电时则相反。充电时, 将式(6)中  $A_{SOC}$  改为  $SOC_{max}$ , 对于所有 ESUs 都满足  $SOC < SOC_{max}$ , 所以  $R_{di}(0) < k_D$ , 且 SOC 越低, 下垂系数越小, 吸收功率越大。放电时, 将  $A_{SOC}$  改为  $SOC_{min}$ ,  $R_{di}(0) < k_D$ , 且 SOC 越高, 输出功率越大。由此可知, 式(8)在保证各 ESU 之间可能存在一定负荷功率分配差距的前提下, 一定程度上减小  $R_{di}(0)$ , 从而减小母线电压偏差。

为使 SOC 快速达到均衡状态并进一步减小该过程产生的母线电压偏差, 本文通过图 6 所示的流程图对功率进行再分配, 以增加各储能之间的功率差值, 进一步减小母线电压偏差。图中  $\alpha$  为常数,  $P_{ESUi}$  为第  $i$  个 ESU 的功率。

初始阶段, 所有 ESUs 按照各自的 SOC 设置  $R_{di}(0)$ , 设置电量变化阈值为  $\alpha = 1\%$ , 当某个 ESU 的  $|\Delta SOC|$  最先达到  $\alpha$  时, 设置此 ESU 为主储能单元, 承担主要功率, 主储能单元的下垂系数自动降低至最小下垂系数  $R_{dmin}$ , 若 ESU 充放电状态改变, 则重新计算  $R_{di}(0)$ 。

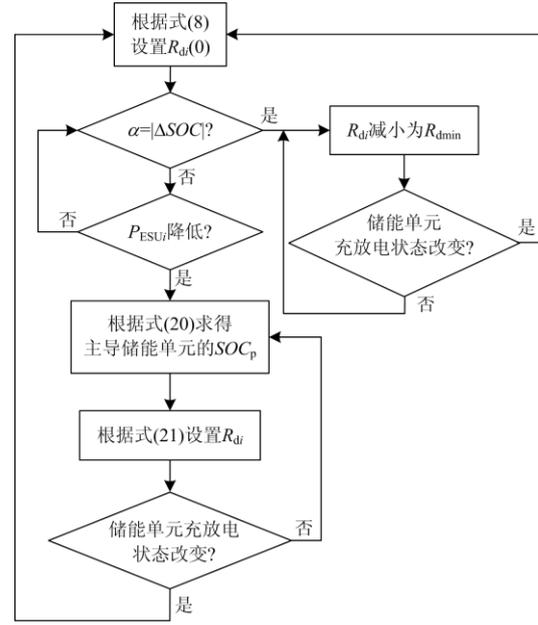


图 6 功率再分配控制流程图

Fig. 6 Flow chart of power redistribution control

下垂系数选取范围如式(9)所示。

$$\frac{\Delta U_{dmin}}{i_{dmin}} \leq R_d \leq \frac{\Delta U_{dmax}}{i_{dmax}} \quad (9)$$

式中:  $i_{dmin}$  和  $i_{dmax}$  分别是分布式电源输出端口电流的最小值和最大值;  $\Delta U_{dmin}$  和  $\Delta U_{dmax}$  分别是允许母线电压偏差的最小值和最大值, 当给定  $\Delta U_{dmin}$  后, 通过式(9)便可求得下垂系数最小值  $R_{dmin}$ 。

显然初始阶段中设置的下垂系数最小的 ESU 的  $\Delta SOC$  最先达到阈值, 即充电时 SOC 最小的 ESU 和放电时 SOC 最大的 ESU 成为主储能单元。当某个 ESU 被设置成主储能单元时, 会使得其吸收或输出的功率突然增加, 进而造成其余 ESUs 吸收或输出的功率降低。当有 ESU 达到阈值时, 其余 ESUs 根据母线电压的小幅度波动和自身功率的降低, 可知主储能单元已被确定, 并依据式(13)一式(20)计算主储能单元此时的 SOC 值。若 ESU 功率未降低, 并且  $\alpha < |\Delta SOC|$ , 说明主储能单元还未确定, 则重新定义  $R_{di}(0)$ 。

将 SOC 定义为

$$SOC_i = SOC_i(0) - \int_0^t \frac{i_{Li}(\tau)}{C_{Bat}} d\tau \quad (10)$$

式中,  $SOC_i$ 、 $SOC_i(0)$ 、 $C_{Bat}$  和  $i_{Li}$  分别为第  $i$  个 ESU 当前的 SOC、初始 SOC、容量和输出电流。由此第  $i$  个 ESU 的 SOC 变化量可推导为

$$\Delta SOC_i = SOC_i - SOC_i(0) = -\int_0^t \frac{i_{Li}(\tau)}{C_{Bat}} d\tau \quad (11)$$

又已知:

$$U_{\text{Bati}} i_{L_i} = U_{\text{dci}} i_{\text{dci}} \quad (12)$$

式中,  $U_{\text{Bati}}$  为第  $i$  个储能电池的端电压。联立式(7)、式(11)、式(12)得

$$\Delta \text{SOC}_i = - \int_0^t \frac{U_{\text{dci}} \Delta U(\tau)}{U_{\text{Bati}} R_{\text{di}} C_{\text{Bat}}} d\tau \quad (13)$$

式中,  $\frac{U_{\text{dci}}}{U_{\text{Bati}}}$  为一定值。充放电过程中主储能单元的 SOC 值可通过式(14)得出。

$$\text{SOC}_p = \text{SOC}_p(0) + \Delta \text{SOC}_1 + \Delta \text{SOC}_2 \quad (14)$$

式中:  $\text{SOC}_p(0)$  为主储能单元的初始 SOC 值;  $t_1$  为主储能单元的  $|\Delta \text{SOC}|$  达到 1% 的时刻;  $\Delta \text{SOC}_1$  为  $0 \sim t_1$  内 SOC 的变化量;  $t$  为计算  $\text{SOC}_p$  的时刻;  $\Delta \text{SOC}_2$  为  $t_1 \sim t$  内 SOC 的变化量。

$$\alpha = |\Delta \text{SOC}_1| \quad (15)$$

当式(15)成立时, 根据式(13), 可将式(15)转换为

$$\alpha = \left| \int_0^{t_1} \frac{U_{\text{dci}} \Delta U(\tau)}{U_{\text{Bati}} R_{\text{di}}(0) C_{\text{Bat}}} d\tau \right| \quad (16)$$

充电时, 由式(8)和式(16)可得主储能单元的 SOC 初始值  $\text{SOC}_{\text{pc}}(0)$  为

$$\text{SOC}_{\text{pc}}(0) = \sqrt[n]{\frac{1}{p} \ln\left(\frac{1}{k_p \alpha}\right) \left| \int_0^{t_1} \frac{U_{\text{dci}} \Delta U(\tau)}{U_{\text{Bati}} C_{\text{Bat}}} d\tau \right|} + \text{SOC}_{\text{max}}^n \quad (17)$$

同理, 放电时主储能单元的 SOC 初始值  $\text{SOC}_{\text{pd}}(0)$  为

$$\text{SOC}_{\text{pd}}(0) = \sqrt[n]{\text{SOC}_{\text{min}}^n - \frac{1}{p} \ln\left(\frac{1}{k_p \alpha}\right) \left| \int_0^{t_1} \frac{U_{\text{dci}} \Delta U(\tau)}{U_{\text{Bati}} C_{\text{Bat}}} d\tau \right|} \quad (18)$$

由式(13)可知:

$$\Delta \text{SOC}_2 = - \int_{t_1}^t \frac{U_{\text{dci}} \Delta U(\tau)}{U_{\text{Bati}} R_{\text{dmin}} C_{\text{Bat}}} d\tau \quad (19)$$

故式(14)可转换为

$$\text{SOC}_p = \begin{cases} \text{SOC}_{\text{pc}}(0) + \alpha - \int_{t_1}^t \frac{U_{\text{dci}} \Delta U(\tau)}{U_{\text{Bati}} R_{\text{dmin}} C_{\text{Bat}}} d\tau & \Delta U < 0 \\ \text{SOC}_{\text{pd}}(0) - \alpha - \int_{t_1}^t \frac{U_{\text{dci}} \Delta U(\tau)}{U_{\text{Bati}} R_{\text{dmin}} C_{\text{Bat}}} d\tau & \Delta U > 0 \end{cases} \quad (20)$$

其余 ESUs 依照式(21)动态改变下垂系数, 直至与主储能单元的 SOC 相同(若充放电状态改变, 则重新计算  $R_{\text{di}}(0)$ )。

$$R_{\text{di}} = \begin{cases} R_{\text{di-min}} \exp[p(\text{SOC}_i^n - \text{SOC}_p^n)] & \Delta U < 0 \\ R_{\text{di-min}} \exp[-p(\text{SOC}_i^n - \text{SOC}_p^n)] & \Delta U > 0 \end{cases} \quad (21)$$

在其他 ESUs 追随主储能单元的过程中, 下垂系数也逐渐趋于最小值  $R_{\text{min}}$ , 减小了母线电压波动。储能系统控制框图如图 7 所示。

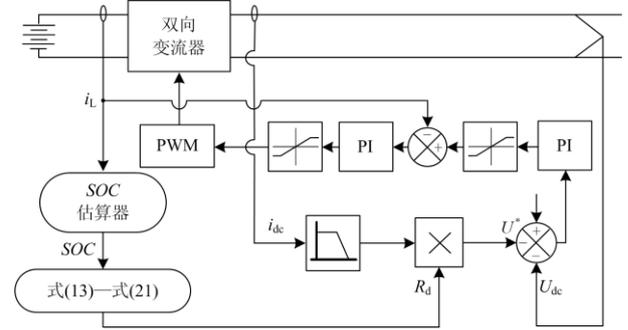


图 7 储能系统控制原理

Fig. 7 Control principle of energy storage system

其过程为: 首先求取 ESU 当前 SOC 值, 将 SOC 值代入计算公式得到各 ESU 的下垂系数  $R_d$ , 然后代入下垂控制器中, 通过电压电流双环控制, 最后通过 PWM 脉宽调制得到控制信号。

### 3 仿真

为了验证本文所提控制策略的有效性。在 Matlab/Simulink 中建立仿真模型, 系统模型包括 SOC 分别为 60%、70% 和 80% 的三组 ESUs, 最大功率约为 3.8 kW 的光伏系统以及可变负荷, 直流母线参考电压为 380 V。针对 ESS 不同运行状态进行仿真验证, 分为单独充放电稳定运行、充放电过程之间的转换以及退出运行三种运行状态。与文献[18]所提控制策略的控制效果进行对比, 验证了本文所提控制策略在 SOC 均衡、减小母线电压波动和维持系统稳定运行等方面的有效性。

#### 3.1 模式 1 下储能系统稳定充放电

模式 1 下, 光伏系统采用变步长 MPPT 控制, ESS 采用改进下垂控制。仿真分别分析了 ESS 稳定充电和放电时的 SOC 均衡情况和母线电压波动情况, 并与文献[18]采用的控制策略在相同情况下的控制结果进行对比。

##### 3.1.1 稳定充电

当光伏出力大于负荷需求时, ESS 处于稳定充电状态。ESS 稳定充电过程的仿真结果如图 8 所示。在 15 s 前, 各 ESU 采用初始下垂系数, 对负荷功率进行分配。15 s 时确定 ESU3 为主储能单元, 对负荷功率进行再分配, 此时, 主储能单元在系统中吸收主要功率。

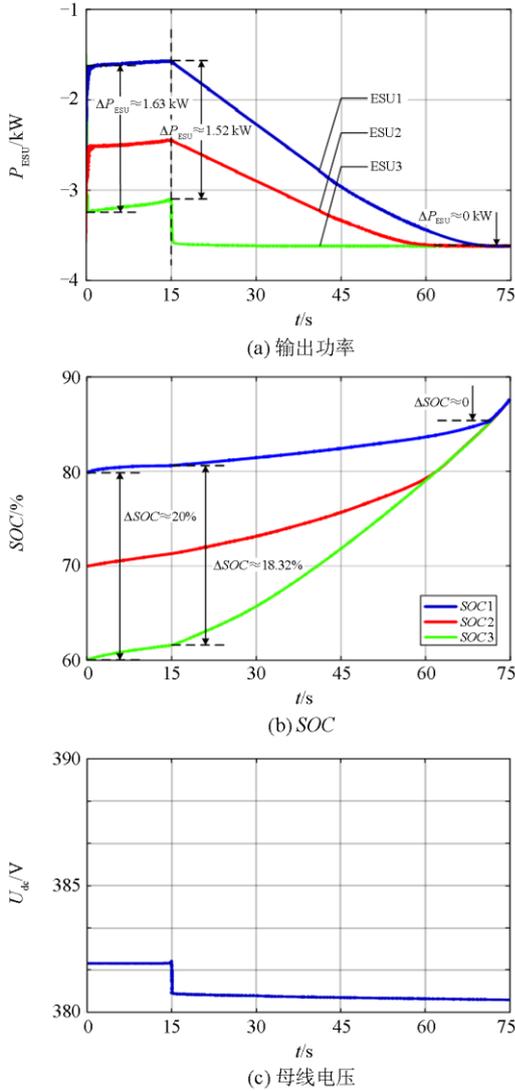


图 8 储能系统稳定充电

Fig. 8 Stable charging of energy storage unit

从图 8 可以看出，在 0 s 设置初始下垂系数后，储能单元间的最大功率差值  $\Delta P_{ESU}$  由约 1.63 kW 降低到约 1.52 kW，SOC 变化量  $\Delta SOC$  由 20% 降低到约 18.32%。母线电压与额定电压的偏差值约为 2.01 V。在确定主储能单元并进行功率再分配后， $\Delta P_{ESU}$  先增大，加快 SOC 均衡速度，后随着  $\Delta SOC$  降低而减小至 0 kW，母线电压偏差随着 SOC 均衡减小至约 0.67 V。文献[18]中控制策略的仿真结果如图 9 所示， $\Delta P_{ESU}$  由约 1.42 kW 降至约 0.61 kW， $\Delta SOC$  由 20% 降至约 8.74%。在该过程中，母线电压偏差值逐渐增大，最后达到约 5.45 V。通过与图 8 对比可知，在 ESS 稳定充电状态下，采用本文控制策略， $\Delta P_{ESU}$  较大，SOC 均衡速度较快，在 SOC 均衡的同时，母线电压波动较小。

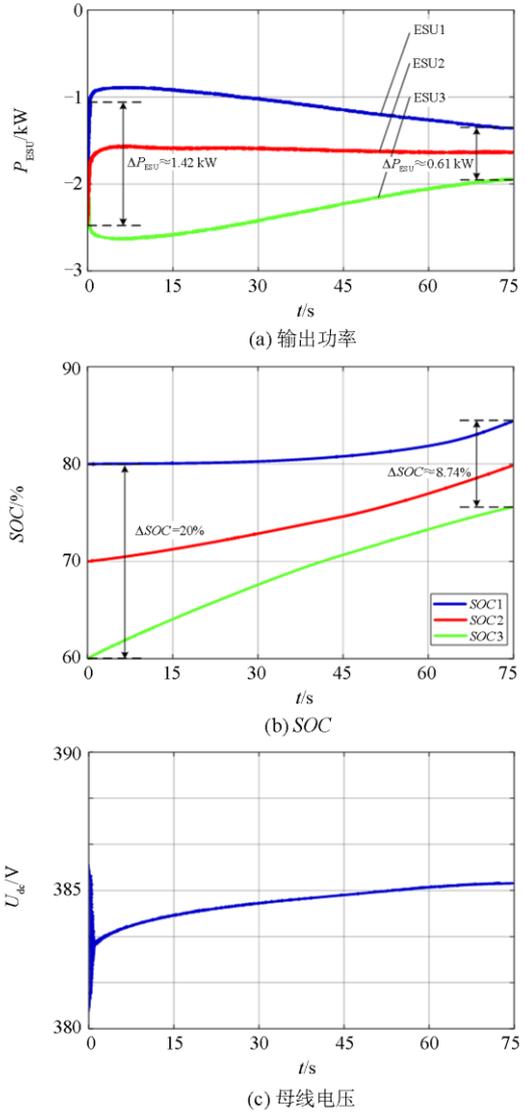


图 9 未改进 SOC 幂指数下垂控制策略下的稳定充电

Fig. 9 Stable charging under the method of SOC power exponent droop control

### 3.1.2 稳定放电

当光伏出力小于负荷需求时，ESS 处于稳定放电状态。ESS 稳定放电仿真结果如图 10 所示，15 s 时进行功率二次分配，放电过程中 ESU1 为主储能单元，主储能单元在系统中提供主要功率，ESU2 和 ESU3 追随 ESU1 的 SOC 变化。

从图 10 可以看出，在设置初始下垂系数后，0~15 s 内， $\Delta P_{ESU}$  降低约 0.90 kW， $\Delta SOC$  降低约 3.08%。直流母线电压与额定电压的偏差值约为 1.41 V。在确定主储能单元并进行功率再分配后， $\Delta P_{ESU}$  先变大后降低至 0 kW， $\Delta SOC$  快速降低至 0，75 s 时，直流母线电压偏差值降低至约 0.51 V。

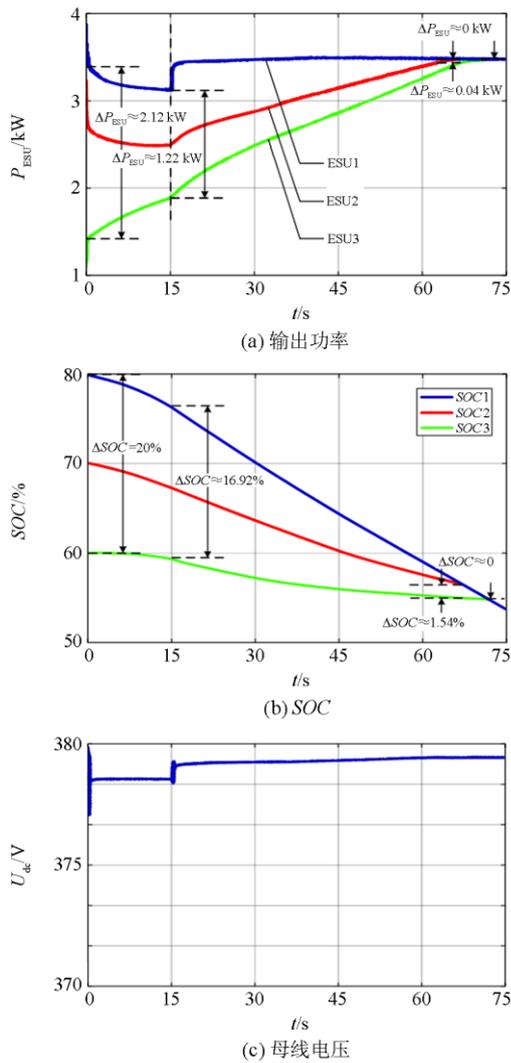


图 10 储能系统稳定放电

Fig. 10 Stable discharging of energy storage unit

文献[18]控制策略下的仿真结果如图 11 所示,  $\Delta P_{ESU}$  由约 2.63 kW 降低至约 0.51 kW,  $\Delta SOC$  由 20% 降低至约 9.48%, 母线电压偏差值逐渐增大, 在 75 s 时达到 5.10 V。对比可知, 在稳定放电过程中, 采用本文控制策略可实现 SOC 快速均衡, 母线电压偏差减小。

### 3.2 模式 1 下功率波动

仿真分别分析了负荷功率波动以及光伏功率波动对系统稳定运行的影响。

#### 3.2.1 模式 1 负荷功率波动

负荷功率波动时的运行特性如图 12 所示。由图 12 可以看出, 总仿真时间为 100 s, 50 s 时负荷功率发生波动, 此时 ESS 由放电状态切换至充电状态,

迅速调整自身输出功率来平衡光伏出力和负荷消耗, 以满足负荷供电需求。

负荷功率发生波动时的 SOC 波形对比图如图 13 所示。

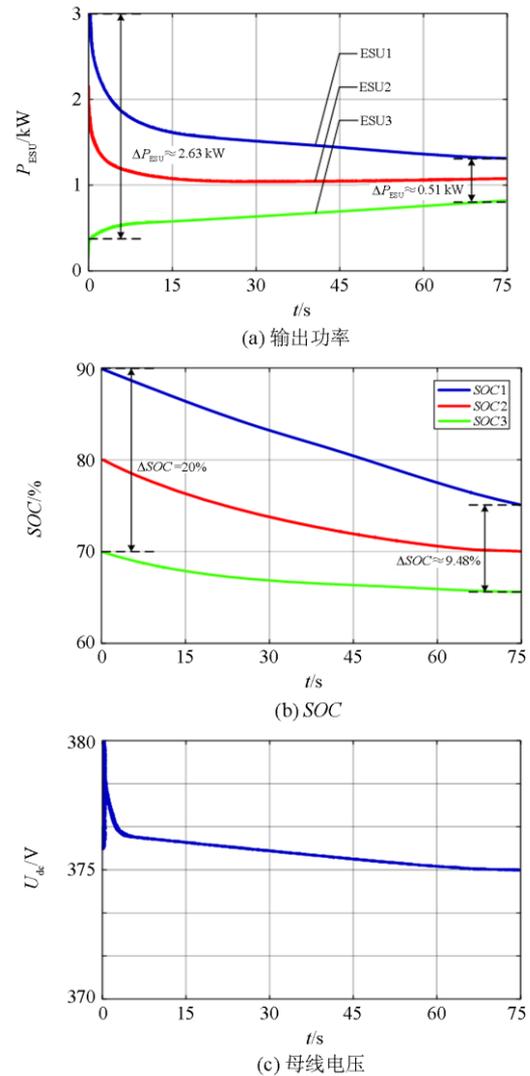
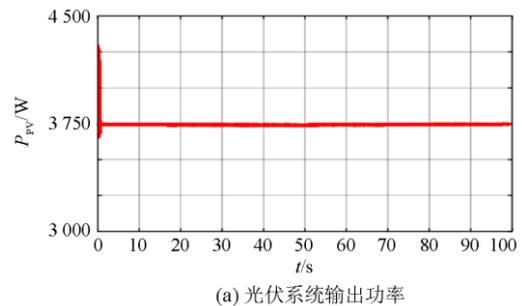


图 11 未改进 SOC 幂指数下垂控制策略下的稳定放电  
Fig. 11 Stable discharging under the method of SOC power exponent droop control



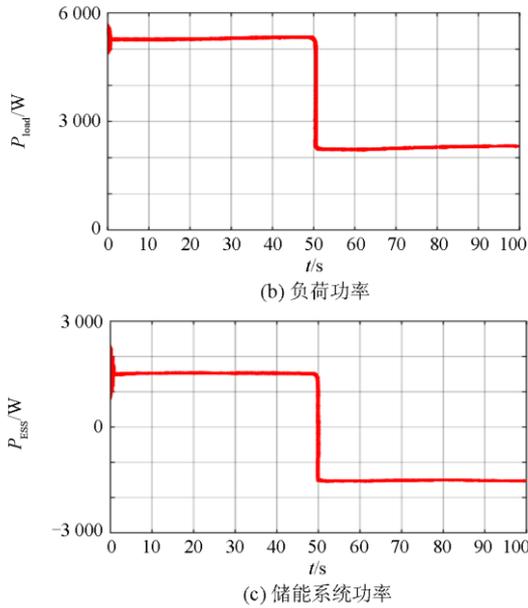


图 12 负荷功率波动时的运行特性

Fig. 12 System operating characteristics when load power fluctuates

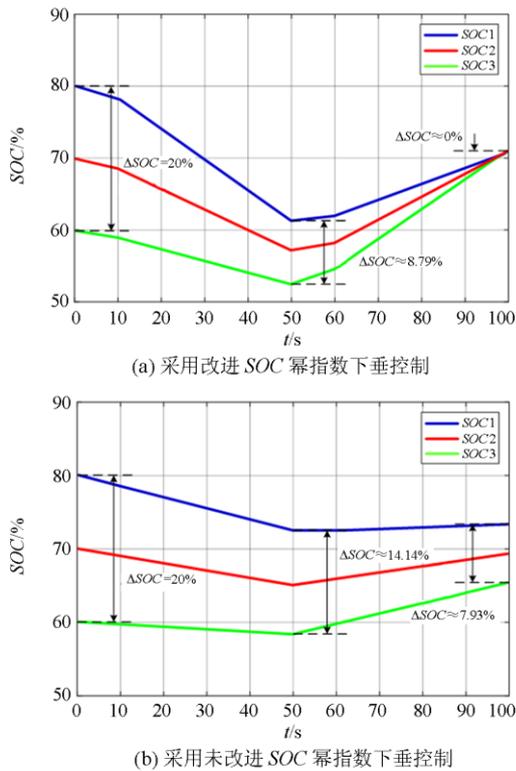


图 13 负荷功率波动时的 SOC 波形

Fig. 13 SOC waveform when load power fluctuates

由图 13(a)可知, 0 s 时, 各 ESU 设置初始下垂系数, 进行负荷功率初分配。由于负荷功率波动,

50 s 时 ESS 充放电状态改变, 10 s 和 60 s 分别确定放电和充电时的主储能单元, 进行负荷功率再分配, 100 s 时, 各 ESU 的 SOC 已达均衡。对比图 13(b)可知, 在本文控制策略下, 当负荷功率波动时, ESS 仍然可以较快达到 SOC 均衡。

负荷功率波动时, 直流母线电压对比图如图 14 所示。

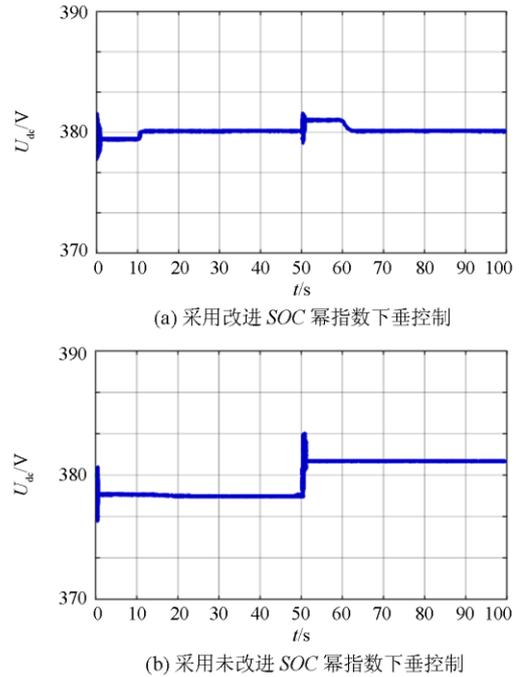


图 14 负荷功率波动时的直流母线电压

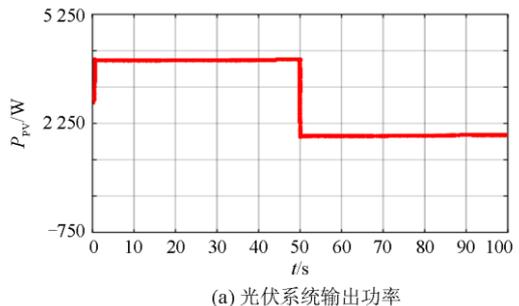
Fig. 14 DC bus voltage when load power fluctuates

从图 14 可以看出, 采用本文控制策略可以明显减少下垂控制方法带来的母线电压偏差, 并且各 ESU 之间 SOC 越接近均衡, 母线电压偏差越小, 而文献[18]中控制策略的仿真结果则相反。

### 3.2.2 模式 1 下光伏功率波动

光伏功率波动时的运行特性如图 15 所示。

由图 15 可以看出, 50 s 时光伏出力减少, 产生功率波动, 此时 ESS 迅速调整输出功率来平衡光伏出力和负荷消耗以满足负荷正常供电。



(a) 光伏系统输出功率

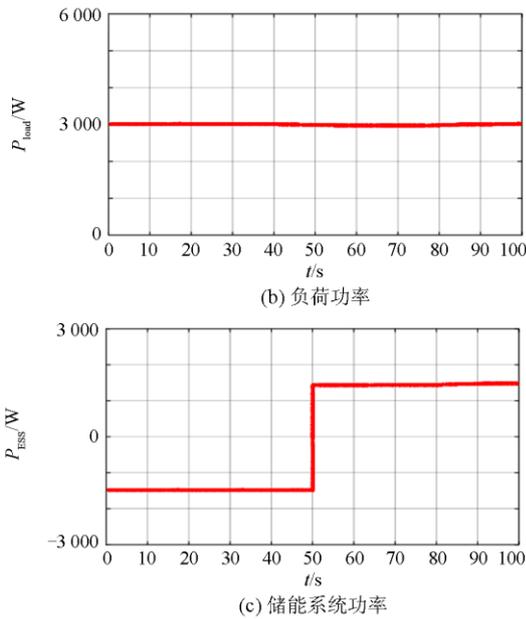


图 15 光伏功率波动时的运行特性

Fig. 15 System operating characteristics when photovoltaic power fluctuates

图 16 和图 17 分别为光伏功率波动时的 SOC 波形对比图和直流母线电压对比图。

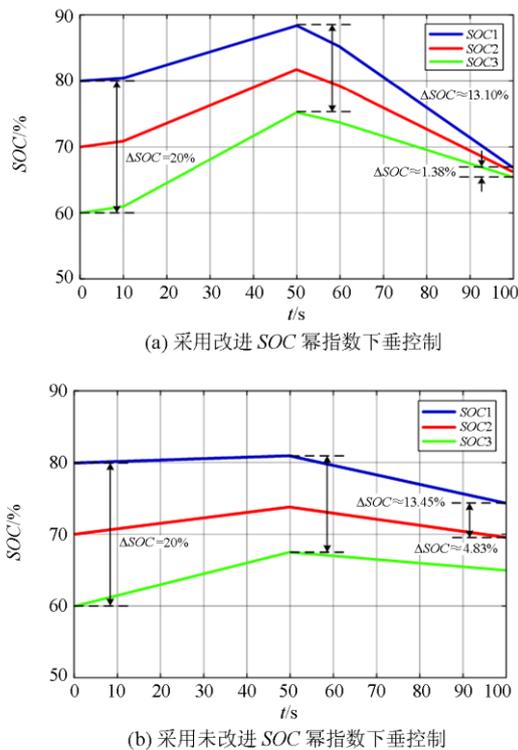


图 16 光伏功率波动时的 SOC 波形

Fig. 16 SOC waveform when photovoltaic power fluctuates

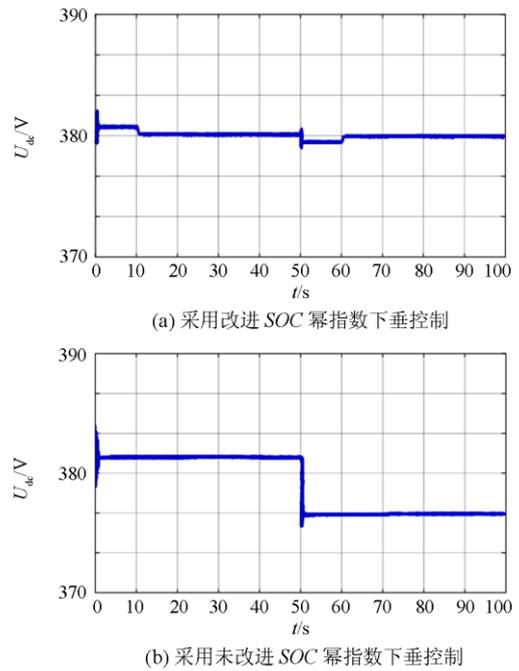


图 17 光伏功率波动时的直流母线电压

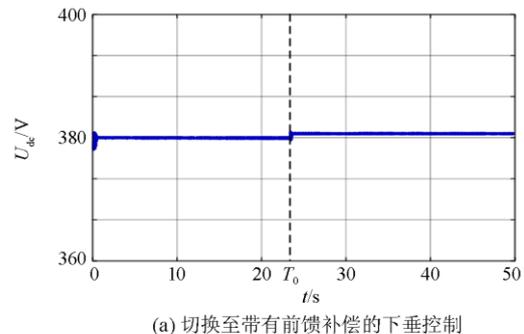
Fig. 17 DC bus voltage when photovoltaic power fluctuates

通过对比结果可知, 在模式 1 下, 光伏功率发生波动时, 采用本文控制策略可以在快速均衡 SOC 的同时, 较明显地减小直流母线电压偏差, 保证系统稳定运行。

### 3.3 模式 2 储能系统退出运行

当  $T_0$  时刻 ESS 因某种原因退出运行时, 系统运行于模式 2。此时, 光伏系统控制切换至带有前馈补偿的下垂控制, 并与切换至传统下垂控制以及未进行切换两种情况下的直流母线电压变化情况进行对比, 对比情况如图 18 所示。

其中图 18(a)为光伏系统由变步长 MPPT 控制切换至带有前馈补偿的下垂控制时母线电压的变化情况, 此种情况下, ESS 退出运行后, 母线电压偏移量约为 0.61 V。图 18(b)为光伏系统切换至传统下垂控制时母线电压的变化情况, 此种情况下, 母线



(a) 切换至带有前馈补偿的下垂控制

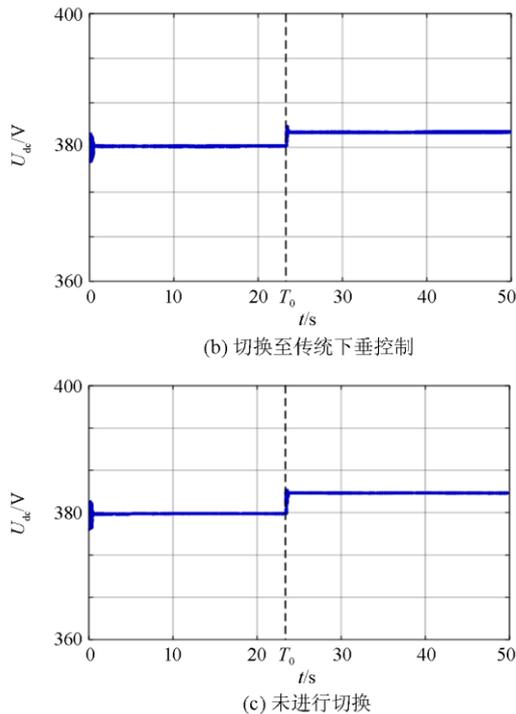


图 18 直流母线电压

Fig. 18 DC bus voltage

电压偏移量约为 2.12 V。图 18(c)为光伏系统未切换控制时母线电压的变化情况,从图中可以看出,直流母线电压偏移量较大,约为 2.73 V。由仿真对比结果可知,当 ESS 退出运行后,光伏系统由原来的变步长 MPPT 控制切换为带有前馈补偿的下垂控制,可以减小母线电压波动,维持系统稳定运行。

#### 4 结论

本文提出一种基于储能改进下垂的直流微电网协调控制策略,在 ESS 正常运行时,考虑到 ESU 间为实现 SOC 均衡会产生母线电压偏差问题,提出 ESS 改进下垂控制策略。初始下垂系数的设置,在保证合理分配负荷功率,加快 SOC 均衡速度的同时,减小母线电压偏差,并通过确定 ESS 中的主储能单元,赋予其允许范围内的最小下垂系数,其他 ESUs 重新调整下垂系数,进行负荷功率再分配,达到快速均衡 SOC 和减小母线电压波动的目的。此外,考虑当 ESS 退出运行时,通过切换光伏系统的控制方式达到稳压目的。根据 ESS 的三种运行状态进行仿真分析,结果表明,所提控制策略在不同的仿真情况下都可使 SOC 快速均衡,减小母线电压偏差,维持独立直流微电网稳定运行,从而验证了所提控制策略的有效性。

#### 参考文献

- [1] 徐晓宁,周雪松.微网脱/并网运行模式平滑切换控制策略[J].高电压技术,2018,44(8):2754-2760.  
XU Xiaoning, ZHOU Xuesong. Control strategy for smooth transfer between grid-connected and island operation for micro grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2754-2760.
- [2] BADAL F R, DAS P, SARKER S K, et al. A survey on control issues in renewable energy integration and microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 87-113. DOI: 10.1186/s41601-019-0122-8.
- [3] LOTFI H, KHODAEI A. AC versus DC microgrid planning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 296-304.
- [4] DUAN J, WANG C, XU H, et al. Distributed control of inverter-interfaced microgrids based on consensus algorithm with improved transient performance[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1301-1312.
- [5] 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 Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [6] 王成山,李微,王议锋,等.直流微电网母线电压波动分类及抑制方法综述[J].中国电机工程学报,2017,37(1):84-98.  
WANG Chengshan, LI Wei, WANG Yifeng, et al. DC bus voltage fluctuation classification and restraint methods review for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 84-98.
- [7] 吴青峰,孙孝峰,王雅楠,等.基于分布式下垂控制的微电网分布式储能系统 SOC 平衡策略[J].电工技术学报,2018,33(6):1247-1256.  
WU Qingfeng, SUN Xiaofeng, WANG Yanan, et al. A distributed control strategy for SOC balancing of distributed energy storage systems in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1247-1256.
- [8] 米阳,纪宏澎,何星璐,等.多储能独立直流微电网自适应分级协调控制[J].中国电机工程学报,2018,38(7):1980-1989,2213.  
MI Yang, JI Hongpeng, HE Xingtang, et al. Adaptive hierarchical coordinated control of multi-energy storage in isolated DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1980-1989, 2213.
- [9] HUANG W, ABU Q J. Energy sharing control scheme for state-of-charge balancing of distributed battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 2764-2776.

- [10] 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.
- [11] 陆晓楠, 孙凯, 黄立培, 等. 直流微电网储能系统中带有母线电压跌落补偿功能的负荷功率动态分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 37-46, 20.  
LU Xiaonan, SUN Kai, HUANG Lipei, et al. Dynamic load power sharing method with elimination of bus voltage deviation for energy storage systems in DC micro-grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 37-46, 20.
- [12] LU X, SUN K, GUERRERO J M, et al. SoC-based droop method for distributed energy storage in DC microgrid applications[C] // International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), May 28-31, 2012, Hangzhou, China: 1640-1645.
- [13] 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.
- [14] DRAGIČEVIĆ T, GUERRERO J M, VASQUEZ J C, et al. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 695-706.
- [15] 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.
- [16] LU X, GUERRERO J M, SUN K, et al. An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1800-1812.
- [17] OLIVEIRA 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, 2017, 8(6): 2597-2607.
- [18] 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.
- [19] 吴济东, 汪可友, 黄鑫, 等. 孤立直流微电网多 DC-DC 变换器分布式协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 76-83.  
WU Jidong, WANG Keyou, HUANG Xin, et al. Distributed coordinated control scheme of parallel DC-DC converters in isolated DC microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 76-83.
- [20] 邓诗蕾, 王明渝. 直流微电网潮流控制器与分布式储能协同控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 40-46.  
DENG Shilei, WANG Mingyu. Cooperative control strategy of DC microgrid power flow controller and distributed energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 40-46.
- [21] HERRERA L, ZHANG W, WANG J. Stability analysis and controller design of DC microgrids with constant power loads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 881-888.
- [22] 袁娜娜, 王允建, 张君, 等. 直流微网中基于 SOC 的改进下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 17-23.  
YUAN Nana, WANG Yunjian, ZHANG Jun, et al. Improved droop control based on SOC in DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 17-23.
- [23] 马爱华. 基于下垂法的直流微电网新型控制策略研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.  
MA Aihua. Research on new control strategy of DC microgrid based on droop method[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017.
- [24] 王盼宏, 王卫, 孟尼娜, 等. 直流微电网离网与并网运行统一控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4388-4396.  
WANG Panbao, WANG Wei, MENG Nina, et al. Unified control strategy of islanding and grid-connected operations for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4388-4396.
- [25] DRAGIČEVIĆ T, GUERRERO J M, VASQUEZ J C, et al. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 695-706.

收稿日期: 2020-06-27; 修回日期: 2020-08-15

作者简介:

张 良(1985—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为智能微电网、V2G 信息交互等; E-mail: xiaozhanghit@163.com

闫凯宏(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网控制。E-mail: 752290377@qq.com

(编辑 许 威)