

# 基于指数型下垂控制的改进 SOC 均衡控制策略研究<sup>\*</sup>

崔关奇 刘毅力 杨茵

(西安工程大学电子信息学院 西安 710048)

**摘要:**为解决储能单元在工作过程中产生的荷电状态(state of charge, SOC)不均衡问题,提出了一种基于指数型下垂控制的改进 SOC 均衡方案。该方案将指数型下垂控制中的放大因子  $n$  与储能单元间的 SOC 差值建立函数关系,使其能够跟随储能单元间的 SOC 差值变化由小到大连续增大,提高了 SOC 的均衡速度,也解决了均衡过程中功率响应速度和功率收敛速度两者不可兼顾的问题,同时在下垂系数中引入容量权重因子,消除了容量对 SOC 均衡的影响。最后,在 MATLAB/Simulink 中搭建了相关模型并仿真验证了所提方案的正确性和有效性。

**关键词:**直流微电网;SOC 均衡;下垂控制;放大因子;容量权重因子

**中图分类号:** TM912 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 480.40

## Research on improved state of charge balance of strategy based on exponential droop control

Cui Guanqi Liu Yili Yang Yin

(College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to solve the imbalance of state of charge (SOC) caused by energy storage units, an improved SOC equalization scheme based on exponential droop control is proposed. The scheme establishes a functional relationship between the amplification factor  $n$  in the exponential droop control and the SOC difference between energy storage units, so that it can gradually increase from small to large along with the change of the SOC difference between energy storage units, which improves the equalization speed of SOC, and also solves the problem that the power response speed and the power convergence speed cannot be considered simultaneously in the equalization process. At the same time, the capacity weighting factor is introduced into the droop coefficient to eliminate the influence of capacity on SOC equilibrium. Finally, the relevant models are built in MATLAB/Simulink and the simulation verifies the correctness and effectiveness of the proposed scheme.

**Keywords:** DC microgrid; state of charge balance; droop control; amplification factor; capacity weighting factor

### 0 引言

近年来,分布式发电技术快速发展,同时用户对直流负载的需求也日益增加<sup>[1-2]</sup>,直流微电网便成为一种可行性高、经济性好的电能供给形式。与交流系统相比,直流微电网不需考虑相位和频率的同步以及涡流损耗问题,具有更高的可靠性<sup>[3]</sup>。

由于可再生能源发电具有较强的间歇性和波动性,因此在直流微电网建设中需加入储能系统以达到平抑扰动、

维持系统功率平衡、保持母线电压稳定的目的<sup>[4-5]</sup>。但蓄电池组在实际使用中,由于各单体电池的不一致性,降低了电池组的整体性能<sup>[6]</sup>。其不一致性主要体现在受充放电次数、环境温度、容量等因素的影响,各个储能单元的荷电状态(state of charge, SOC)会出现差异。如果储能单元在 SOC 不均衡的情况下长时间工作,会导致某些储能单元过充过放或者提前退出,进而影响储能系统的使用寿命,甚至造成系统崩溃<sup>[7-9]</sup>。因此,对储能单元的 SOC 均衡控制策略进行研究对直流微电网稳定安全运行具有重要意义。

收稿日期:2022-11-28

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金(61871318)项目资助

传统下垂控制只能按特定比例来分配功率或电流,不能动态调节下垂系数来实现 SOC 均衡<sup>[10]</sup>。对于以上问题,开展了大量研究。文献[11]以传统下垂控制为基础,增加电压补偿环节和 SOC 控制环节来提高系统的稳定性,但随着 SOC 差值的减小,存在后期均衡速度较慢的问题。文献[12]对指数型下垂控制进行改进来提高后期的均衡速度,其改进方法是使变速因子匀速跳变,但该改进方案中变速因子不是连续变化的,受调整步长和匀速增加值的制约,会导致输出功率突变,不利于系统稳定运行,而且未考虑容量对 SOC 均衡的影响。文献[13-14]提出了依据 SOC 比例因子来设置参考电压函数的方法来实现 SOC 均衡,但该方法会造成母线电压产生较大的波动。

基于以上分析,本文提出一种连续动态改变放大因子的改进下垂控制策略。该方案将指数型下垂控制中的放大因子  $n$  与储能单元间的 SOC 差值  $\Delta SOC$  建立函数关系,使  $n$  跟随  $\Delta SOC$  的变化连续增大,解决了功率响应和功率收敛两者速度不可兼顾的问题;其次引入容量权重因子以消除容量对 SOC 均衡的影响,同时还能保证直流母线电压的稳定。与已有的基于指数型下垂控制的改进 SOC 均衡控制策略相比,本文所提控制策略能够实现放大因子  $n$  和输出功率平稳连续变化,提高了系统稳定性,而且在储能单元容量不同时也能够实现 SOC 均衡。最后通过 MATLAB /Simulink 仿真验证了所提控制策略的正确性和有效性。

### 1 独立直流微电网系统结构

典型的独立直流微电网结构如图 1 所示,主要由分布式电源、负载、储能系统和接口变换器 4 部分组成<sup>[15]</sup>。在独立直流微电网中为了提高能源利用率,分布式电源通常运行在最大功率点跟踪模式下。由于分布式电源的输出

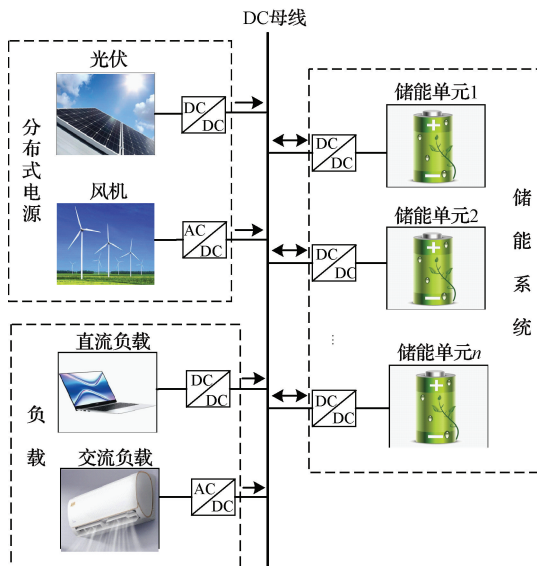


图 1 独立直流微电网结构

功率和负载所需的功率是实时变化的,需设置储能系统来吸收或补给直流母线上冗余或缺额功率,以维持直流母线电压的稳定。

### 2 SOC 均衡控制策略

#### 2.1 传统下垂控制原理分析

传统下垂控制是在控制中加入虚拟电阻来改变输出电流的方法。在直流微电网中,传统电压-电流(U-I)垂控制特性表达式为:

$$U_{dc-i-ref} = U_{ref} - R_i I_{dc-i} \quad (1)$$

式中: $U_{dc-i-ref}$  为第  $i$  个变换器的输出电压参考值, $U_{ref}$  为参考电压,一般为直流母线的额定电压, $R_i$  为下垂系数, $I_{dc-i}$  为输出电流。

根据式(1)可以得到下垂控制特性曲线,如图 2 所示。

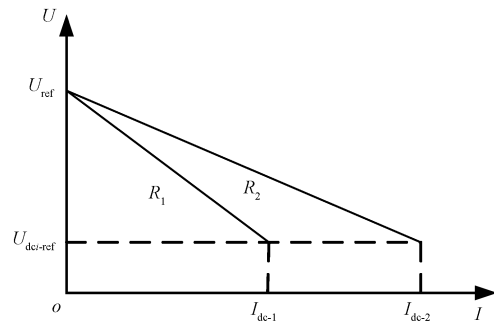


图 2 传统 U-I 下垂控制特性曲线

图 3 所示为加入下垂控制后,含有两台储能变换器的并联等效电路,其中  $r_1$ 、 $r_2$  分别表示变换器到直流母线的线路阻抗, $I_{load}$  和  $R_{load}$  分别表示负载电流和负载阻抗。

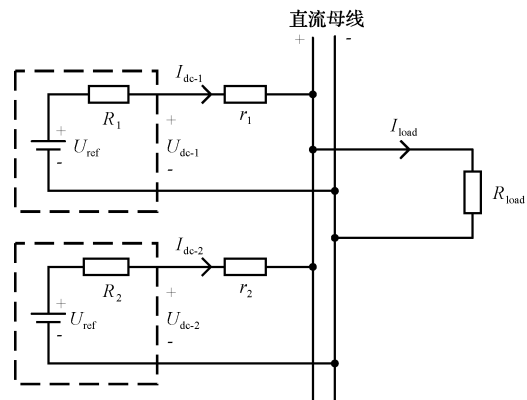


图 3 含两台储能变换器的并联等效电路

根据图 3 得到 KVL 和 KCL 方程:

$$U_{ref} = I_{dc-1}(R_1 + r_1) + I_{load}R_{load} \quad (2)$$

$$U_{ref} = I_{dc-2}(R_2 + r_2) + I_{load}R_{load} \quad (3)$$

$$I_{load} = I_{dc-1} + I_{dc-2} \quad (4)$$

根据式(2)~(4)可得两台变换器得输出电流  $I_{dc-1}$  和  $I_{dc-2}$  分别为:

$$I_{dc-1} = \frac{R_2 + r_2}{(R_1 + r_1)(R_2 + r_2) + (R_1 + r_1 + R_2 + r_2)R_{load}} \quad (5)$$

$$I_{dc-2} = \frac{R_1 + r_1}{(R_1 + r_1)(R_2 + r_2) + (R_1 + r_1 + R_2 + r_2)R_{load}} \quad (6)$$

由此可得输出电流之比为：

$$\frac{I_{dc-1}}{I_{dc-2}} = \frac{R_2 + r_2}{R_1 + r_1} \quad (7)$$

一般情况下，下垂系数的设置是远大于线路阻抗的，线路阻抗可忽略不计，由此得：

$$\frac{I_{dc-1}}{I_{dc-2}} = \frac{R_2}{R_1} \quad (8)$$

结合图2和式(8)可知，输出电流和下垂系数成反比，改变下垂系数可改变输出电流，进而实现功率再分配。但是传统的下垂控制中没有引入SOC这一变量，电流或功率只能按照特定比例来进行分配，所以不能实现SOC均衡，因此需对下垂控制加以改进，达到SOC自均衡的目的<sup>[16]</sup>。

### 2.2 指数型下垂控制的SOC均衡原理

为实现蓄电池SOC自均衡，需将SOC信息与下垂系数 $R_i$ 相结合。指数型下垂控制策略为：

$$U_{dc-ref} = U_{ref} - R_i(SOC_i)I_{dc-i} \quad (9)$$

其中：

$$R_i(SOC_i) = \begin{cases} \frac{R_0}{e^{n \cdot (1-SOC_i)}}, & I_{dc-i} < 0 \\ \frac{R_0}{e^{n \cdot SOC_i}}, & I_{dc-i} > 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中： $R_i(SOC_i)$ 为指数型SOC下垂系数； $R_0$ 为固定的初始下垂系数； $n$ 为放大因子； $I_{dc-i} < 0$ 表示储能单元工作在充电模式； $I_{dc-i} > 0$ 表示储能单元工作在放电模式。

通常情况下，储能单元的SOC使用安时积分法来进行估算，其表达式为：

$$SOC_i = SOC_{i0} - \frac{\int I_{dc-i} dt}{C_{ei}} \quad (11)$$

式中： $SOC_{i0}$ 为储能单元的初始荷电状态； $C_{ei}$ 为储能单元的容量。

以两个储能单元为例，两者SOC的关系为 $SOC_1 > SOC_2$ ，根据式(10)可知，在充电模式下， $R_1(SOC_1) > R_2(SOC_2)$ ，根据式(8)可知，输出电流和下垂系数成反比，所以前者充电功率小于后者，在容量等其他因素相同的情况下，前者的SOC上升速度小于后者，最终实现均衡。同理，在放电模式下， $R_1(SOC_1) < R_2(SOC_2)$ ，前者放电功率大于后者，在容量等其他因素相同的情况下，前者的SOC下降速度大于后者，最终实现均衡。

### 2.3 指数型下垂控制特性分析及其局限性

在整个指数型下垂控制的SOC均衡过程中，输出功

率情况如图4所示。

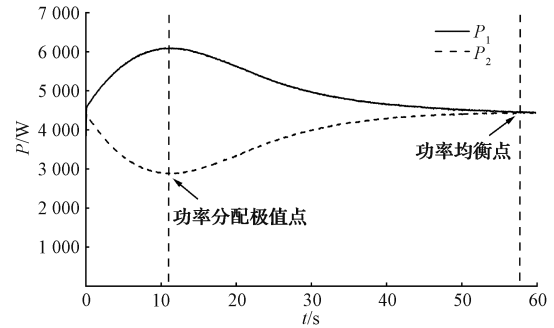


图4 功率分配

由图4可知，在SOC均衡过程中，以功率分配极值点为界，功率分配可分为两个阶段。在功率分配极值点之前，两储能单元的输出功率差值逐渐增大，直到达到各自的极大值点和极小值点，此阶段称为功率响应阶段。在功率分配极值点之后，两储能单元的输出功率逐渐接近，最终实现功率均分，此时也表明SOC实现均衡，此阶段称为功率收敛阶段。

在功率响应阶段，系统的响应速度主要由下垂系数决定。下垂系数大，响应速度快；下垂系数小，响应速度慢。根据式(10)可得放电模式下 $SOC_i$ 和 $R_i(SOC_i)$ 函数关系，如图5所示，在SOC相同时，下垂系数随放大因子 $n$ 的减小而增大。所以在功率响应阶段，适当减小放大因子 $n$ 可以减少功率响应的时

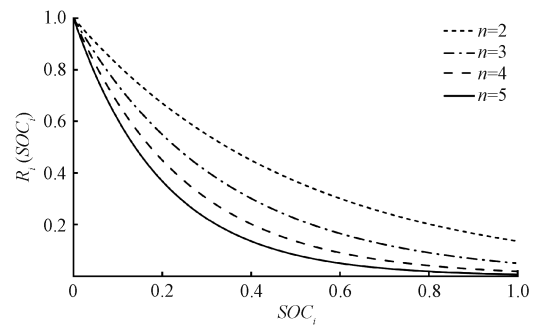


图5  $SOC_i$ 和 $R_i(SOC_i)$ 函数关系

进一步分析功率收敛阶段，对式(11)进行一阶求导：

$$\dot{SOC}_i = -\frac{I_{dc-i}}{C_{ei}} \quad (12)$$

以放电模式为例，联立式(9)、(10)、(12)，得：

$$\dot{SOC}_i = \frac{U_{dc-ref} - U_{ref} e^{n \cdot SOC_i}}{C_{ei} R_0} \quad (13)$$

由式(13)可知，SOC的变化率主要与放大因子 $n$ 和储能单元的容量有关，假设各储能单元的容量相同，放大因子 $n$ 便是决定SOC变化率的唯一因素。式(13)也表明在放电过程中，若 $SOC_1 > SOC_2$ ，则 $\dot{SOC}_1 > \dot{SOC}_2$ ，两储

能单元间便会逐渐均衡,再次验证了指数型下垂控制的SOC均衡原理。

仍以两个储能单元为例,结合式(13),两个储能单元SOC变化率的比值为:

$$\frac{\dot{SOC}_1}{\dot{SOC}_2} = \frac{e^{n \cdot SOC_1}}{e^{n \cdot SOC_2}} = e^{n \cdot \Delta SOC} \quad (14)$$

根据式(14)得到不同放大因子  $n$  对应的  $\Delta SOC$  与 SOC 变化率比值曲线如图6所示。

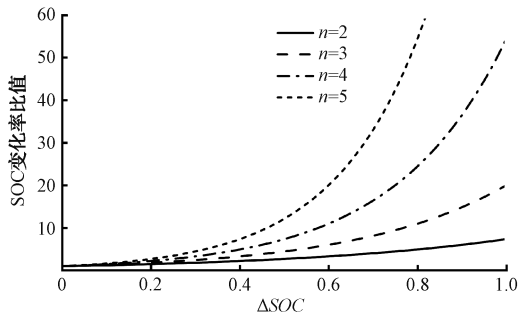


图6  $\Delta SOC$  与 SOC 变化率比值的函数关系

由图6可知,  $\Delta SOC$  相同时,放大因子  $n$  越大, SOC 变化率的比值就越大,即功率收敛阶段 SOC 的均衡速度就越快。在  $\Delta SOC = 0$ ,即实现储能单元间 SOC 均衡时,无论  $n$  取何值, SOC 变化率的比值都等于1,说明此时功率均分。由于 SOC 的值在  $0 \sim 1$ ,数值较小,而且在均衡后期,储能单元间的 SOC 差异过小,造成功率分配差值过小,进而导致均衡速度过慢,放大因子  $n$  可以放大储能单元间的 SOC 差异。所以在功率收敛阶段,适当增大放大因子  $n$  可以提高均衡速率。

通过以上分析可知,功率分配的两个阶段都受到放大因子  $n$  的影响。不同的是,在放大因子  $n$  较大时,功率收敛速度快但功率响应速度慢;在放大因子  $n$  较小时,功率响应速度快但功率收敛速度慢。即功率响应速度和功率收敛速度两者间存在矛盾,若放大因子  $n$  取固定值,则两者之间必须做出取舍,不可兼顾。

由式(11)可知,储能单元的容量对 SOC 也会产生影响。在工程应用中,储能单元的初始容量一般会设置为同一数值,但是在使用过程中,受充放电次数、充放电深度、工作环境及温度的影响,储能单元的容量也会有所差别。在系统扩容或升压时,容量也是必须考虑的因素之一。传统指数型下垂控制并未考虑容量对 SOC 均衡的影响,由式(13)可知,若储能单元间容量不同,即使达到功率均衡, SOC 也不能实现均衡,反而会相差越来越大,造成严重后果。

综上所述,指数型下垂控制的局限性主要有如下两点:1)功率响应速度和功率收敛速度两者不可兼顾;2)未考虑容量对 SOC 均衡的影响,在功率达到均衡时,反而不利于 SOC 均衡。

### 3 基于指数型下垂控制的改进方案

目前已有的基于指数型下垂控制的改进方案主要针对变速因子进行优化。优化后变速因子的变化情况如图7所示。

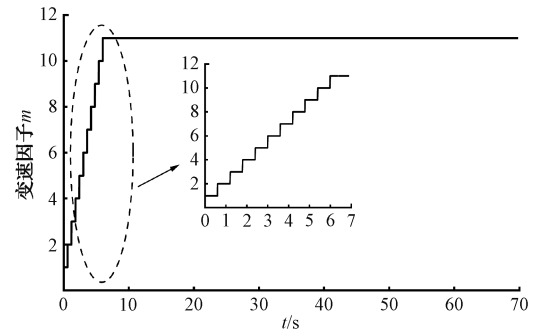


图7 变速因子变化波形

由图7可知,该方案中变速因子是匀速跳变而非连续变化的。虽然该改进方案一定程度上解决了功率响应速度和功率收敛速度两者不可兼顾的问题,但变速因子的非连续性变化会导致输出功率突变,不利于系统稳定运行。而且该方案不能解决指数型下垂控制存在的第2个局限性,即未考虑容量对 SOC 均衡的影响。

#### 3.1 放大因子的优化

为解决功率响应速度和功率收敛速度两者不可兼顾的问题,本文对放大因子  $n$  进行优化,提出一种连续动态改变放大因子  $n$  的 SOC 均衡控制策略。具体方法是将储能单元间的 SOC 差值  $\Delta SOC$  和放大因子  $n$  建立函数关系,使放大因子  $n$  随  $\Delta SOC$  的变化由小到大逐渐递增,直至最大值。利用该方法不仅可以保证功率平稳变化,而且可以同时提高功率响应速度和功率收敛速度。

由于放大因子  $n$  的取值有一定的限制,取值过大会造成母线电压偏差过大,取值过小会造成 SOC 均衡后期速度过慢,所以存在约束条件:

$$1 \leq n \leq n_{\max} \quad (15)$$

因为放大因子  $n$  随  $\Delta SOC$  的变化由小到大连续递增,所以对  $\Delta SOC$  的范围进行限制,便能够使放大因子  $n$  保持在合理范围内,由此可得:

$$n = \begin{cases} f(\Delta SOC), & \Delta SOC_0 - \xi \leq \Delta SOC \leq \Delta SOC_0 \\ n_{\max}, & 0 \leq \Delta SOC < \Delta SOC_0 - \xi \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\Delta SOC$  为各储能单元 SOC 的最大值与最小值之差,即  $\Delta SOC = SOC_{\max} - SOC_{\min}$ ;  $\Delta SOC_0$  为各储能单元 SOC 初始值的最大值与最小值之差,即  $\Delta SOC_0 = SOC_{0\max} - SOC_{0\min}$ ;  $\xi$  为约束因子。

在该优化方案中,约束了  $n$  随  $\Delta SOC$  变化的范围,可以调控放大因子  $n$  的变化速度;  $f(\Delta SOC)$  是  $n$  关于  $\Delta SOC$  的函数表达式,用以保证  $n$  在约束范围内可以逐渐

增大到最大值。若  $\xi$  取值过小,会导致  $n$  在短时间内迅速增加至最大值  $n_{max}$ ,其效果和优化之前接近,缩短功率响应时间的效果不明显,不能达到应有的调节目的;若  $\xi$  取值过大,会降低  $n$  的增大速率,使均衡过程在功率响应和功率收敛阶段间不断切换,导致系统收敛速度过慢。因此,约束因子  $\xi$  和  $f(\Delta SOC)$  应相互配合,在保证系统实现均衡的前提下,减少功率响应和功率收敛的时间,提高 SOC 的均衡速度。经过多组仿真验证对比,最终选用式(17)可以在保证系统稳定的同时,提高 SOC 均衡速率。

$$n = \begin{cases} -1000[\Delta SOC - (\Delta SOC_0 - 0.1)] + 101, & \Delta SOC_0 - 0.01 \leq \Delta SOC \leq \Delta SOC_0 \\ 11, & 0 \leq \Delta SOC < \Delta SOC_0 - 0.01 \end{cases} \quad (17)$$

### 3.2 容量权重因子

为了消除容量对 SOC 均衡的影响,引入容量权重因子对 SOC 均衡方案进一步优化。容量权重因子的表达式如下:

$$\alpha = \frac{C_{ei}}{\max(C_{e1}, C_{e2}, \dots, C_{em})} \quad (18)$$

式中:  $C_{ei}$  为第  $i$  个储能单元的容量;  $m$  表示系统中共有  $m$  个储能单元。

将容量权重因子引入式(10),得:

$$R_i(SOC_i) = \begin{cases} \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{R_0}{e^{n \cdot (1 - SOC_i)}}, & I_{dc-i} < 0 \\ \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{R_0}{e^{n \cdot SOC_i}}, & I_{dc-i} > 0 \end{cases} \quad (19)$$

仍以放电模式为例,联立式(13)、(18)、(19),得:

$$\dot{SOC}_i = \frac{(U_{dc-i-ref} - U_{ref}) e^{n \cdot SOC_i}}{C_{max} R_0} \quad (20)$$

由式(20)可知,容量权重因子引入之后,容量与储能单元的 SOC 变化率无关。由式(19)可知,放电模式下,容量大的储能单元释放电能较多;在充电模式下,容量大的储能单元吸收电能较多。因此,引入容量权重因子可以在充放电过程中各储能单元之间按容量进行功率分配,进而消除容量对 SOC 均衡的影响。

综上所述,本文所提出的基于指数型下垂控制的 SOC 均衡改进方案控制框图如图 8 所示,其中两个子模块采用的控制策略完全相同。从图 8 可知,该控制策略无需模块与模块间传递信息,每个储能单元只需采集自身数据即可,同时由于将放大因子  $n$  限定在合理范围内,所以无需对母线电压进行二次控制,有效降低了系统的复杂度,提高了系统的稳定性。

### 4 仿真验证

基于理论分析,在 MATLAB/Simulink 中搭建了包含光伏、风机、可变负载和两个储能单元的独立直流微电网储能系统仿真模型。本文设计了 3 种仿真实验以验证所提控制策略的有效性和正确性:仿真分析固定放大因子  $n$

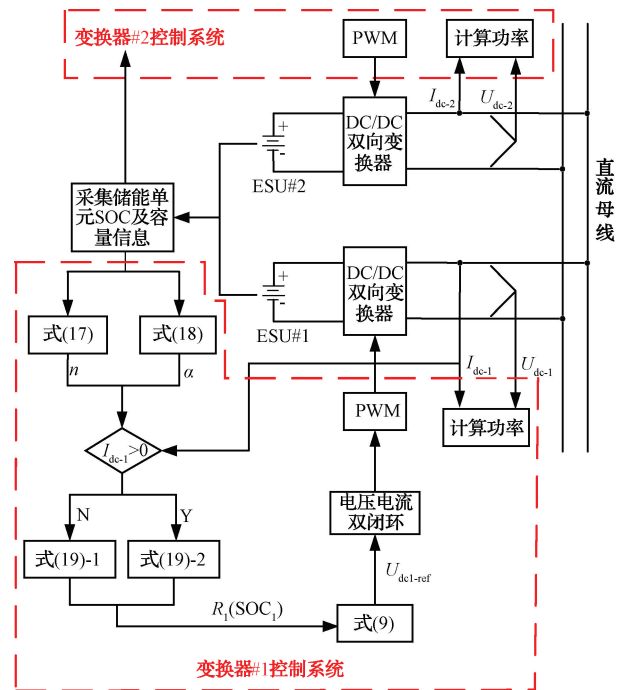


图 8 基于指数型下垂控制的 SOC 均衡改进方案控制框图

对 SOC 均衡过程的影响;仿真分析采用优化放大因子  $n$  之后的 SOC 均衡过程,比较优化前后的均衡效果;设置不同容量的储能单元,仿真分析引入容量权重因子之后的 SOC 均衡过程,比较引入容量权重因子前后的均衡效果。

#### 4.1 固定放大因子 $n$ 的下垂控制仿真验证

在对固定放大因子  $n$  的下垂控制进行仿真验证时所采用的仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数名称	取值
直流母线电压 $U_{ref}$	400 V
初始下垂系数 $R_0$	0.001
光伏输出功率 $P_{pv}$	12 kW
风机输出功率 $P_w$	19.3 kW
负载功率 $P_{load}$	40 kW
储能模块 1 初始荷电状态 $SOC_{10}$	60%
储能模块 2 初始荷电状态 $SOC_{20}$	50%
储能模块容量 $C_{ei}$	1 Ah

固定放大因子  $n=8, 11$  时的下垂控制仿真波形如图 9、10 所示。

分析图 9 和 10 可知,传统指数型下垂控制可以实现功率的合理分配及 SOC 均衡。对比图 9(a) 和 10(a) 可知,放大因子  $n=8$  时,功率响应阶段所需的时间要少于放大因子  $n=11$  时功率响应阶段所需的时间;但是在均衡后半部分,即功率收敛阶段,放大因子  $n=11$  时所需的收敛时间要少于放大因子  $n=8$  时所需的收敛时间。从 SOC

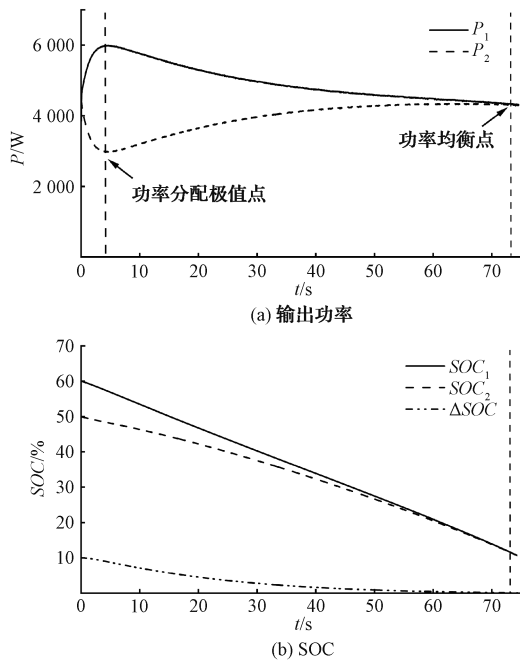


图9 放大因子  $n=8$  时,下垂控制仿真波形

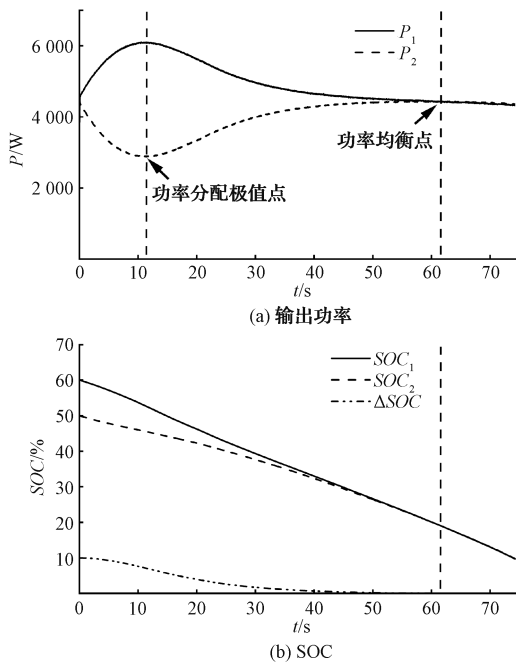


图10 放大因子  $n=11$  时,下垂控制仿真波形

均衡的整个过程来看,放大因子  $n=11$  时所需的时间更短。说明放大因子  $n$  可以加快 SOC 的均衡速度,且放大因子  $n$  越大,功率响应阶段持续时间越长,功率收敛阶段持续时间越短,两者存在不可兼顾的问题,与理论分析相符合。仿真结果如表 2 所示。

#### 4.2 优化放大因子 $n$ 的下垂控制仿真验证

通过改变放大因子  $n$  来对比优化前后功率均衡过程的变化。优化后的放大因子  $n$  的变化波形如图 11 所示,

$n$	功率响应时间/s	功率收敛时间/s	SOC 均衡时间/s
8	4.08	74.08	74.08
11	11.78	62.32	62.32

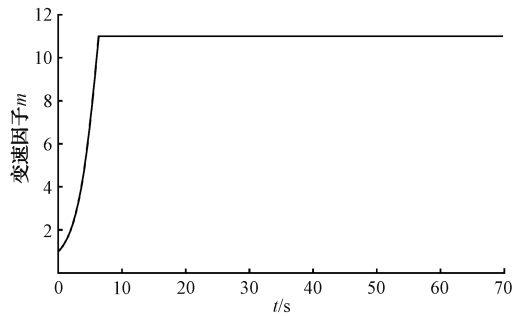


图 11 放大因子  $n$  的变化波形

可以看到  $n$  的取值不再为固定值,也不采用非连续的匀速跳变的形式,而是随  $\Delta SOC$  的变化从 1 开始由小到大连续增大,直到其最大值 11。

仿真参数仍选择如表 1 所示。对比图 12(a)和图 10(a)可知,相比于优化之前,优化之后功率分配极值点的出现时间有所提前,大约在 10.52 s,提前了 1.26 s,这表明对放大因子  $n$  进行优化之后功率响应阶段所需的时间有所减少;功率均衡点出现的时间也有所提前,大约在 58.51 s,提前了 3.81 s。对比图 12(b)和 10(b)可知,优化之后整个 SOC 均衡过程的时间有所减少。仿真结果如表 3 所示,结果表明对放大因子  $n$  进行优化之后有效的解决了功率响应速度和功率收敛速度两者不可兼顾的问题,

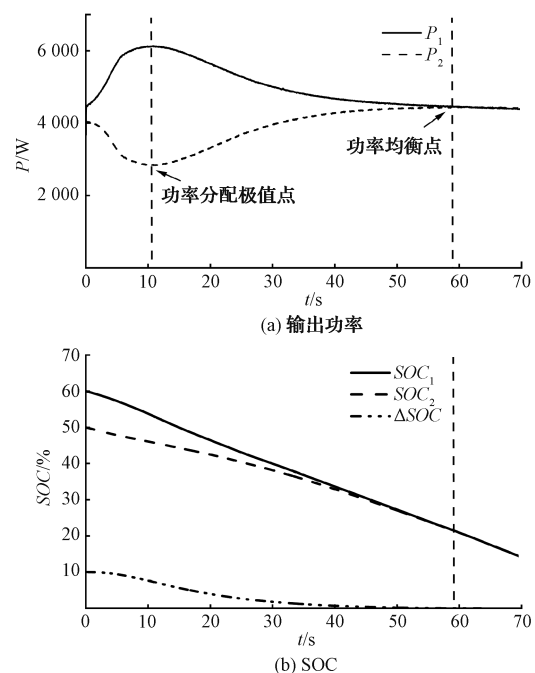


图 12 放大因子  $n=11$  时,优化后的下垂控制仿真波形

而且可以提升 SOC 的均衡速度。

表 3 优化前后仿真结果对比

$n=11$	功率响应	功率收敛	SOC 均衡
	时间/s	时间/s	时间/s
优化前	11.78	62.32	62.32
优化后	10.52	58.51	58.51

如图 13 所示,在整个 SOC 均衡过程中,母线电压一直稳定在 400 V 左右,电压偏移值在 5 V 以内,在允许电压偏移的范围之内,这表明本文所提控制策略不会造成母线电压偏差过大,可以保持系统稳定可靠运行。

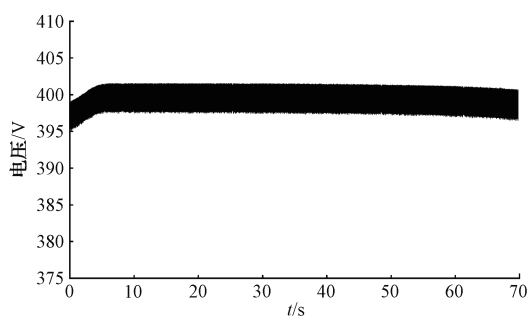


图 13 直流母线电压波形

### 4.3 引入容量权重因子的下垂控制仿真验证

为验证储能单元的容量及引入容量权重因子之后对 SOC 均衡的影响,将储能单元 1 的容量设置为 2 Ah,储能单元 2 的容量设置为 1 Ah,即  $C_{e1}:C_{e2}=2:1$ ,其余仿真参数保持不变。未引入容量权重因子的下垂控制仿真波形如图 14 所示。由图 14(a)可知,在功率响应阶段,两储能单元输出的功率差值逐渐增大,SOC 也缓慢趋于一致。在功率收敛阶段,两储能单元的输出功率之比趋于 2:1,和容量之比相同,此时图 14(b)的 SOC 并未达到均衡,由于两储能单元的容量之比和输出功率之比相同,所以 SOC 变化率相同,此后 SOC 不能实现均衡,效果类似于固定下垂系数的下垂控制方法。

引入容量权重因子之后的下垂控制仿真波形如图 15 所示。如图 15(a)所示,由于考虑了容量对 SOC 均衡的影响,在 SOC 均衡初期两储能单元输出的功率差值迅速增大,相较于图 14(a),引入容量权重因子后两储能单元输出功率差值更大,最高达到 5.8 kW,而引入容量权重因子前仅为 4.3 kW,这就使 SOC 快速趋于一致,如图 15(b)所示。当两储能单元的 SOC 均衡时,其输出功率分别为 6 和 3 kW,完全按照 2:1 的容量之比输出功率,此后 SOC 以相同速率变化,达到 SOC 均衡的目的。仿真结果表明,引入容量权重因子可以消除容量对 SOC 均衡的影响,在各个储能单元容量不同时仍可以实现 SOC 均衡。

## 5 结论

为解决独立直流微电网中储能单元 SOC 不均衡的问

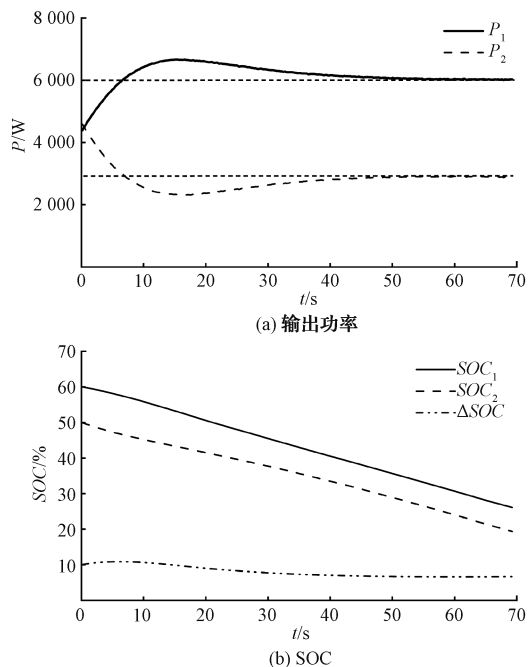


图 14 未引入容量权重因子的下垂控制仿真波形

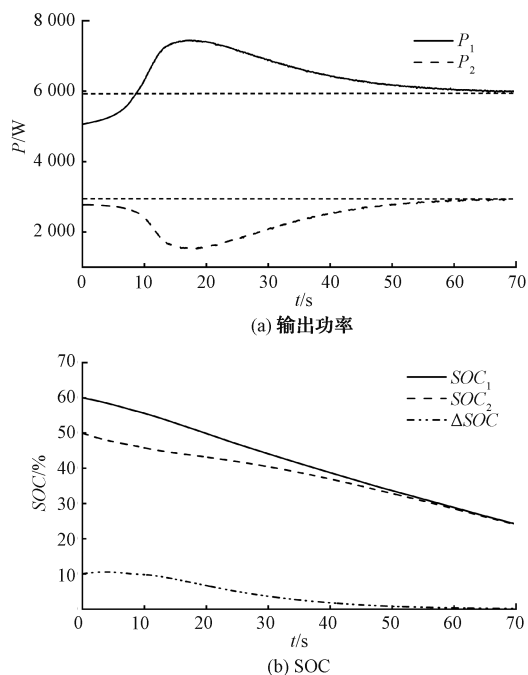


图 15 引入容量权重因子的下垂控制仿真波形

题,本文在分析传统指数型下垂控制的特性及其局限性的基础上,提出了一种优化放大因子  $n$  和引入容量权重因子的改进下垂控制方案。与已有的基于指数型下垂控制的改进方案相比,本文所提控制策略能够实现放大因子  $n$  和输出功率平稳连续变化,提高了系统稳定性,而且在储能单元容量不同时也能够实现 SOC 均衡。最后通过理论分析和仿真验证证明了所提方案的有效性和正确性。本文

得出如下结论,在放大因子  $n$  的优化方案中将储能单元间的 SOC 差值  $\Delta SOC$  和放大因子  $n$  相结合,使放大因子  $n$  随  $\Delta SOC$  的变化由小到大连续递增,直至最大值。该方案不仅能够解决功率响应速度和功率收敛速度两者不可兼顾的问题,而且能够实现放大因子  $n$  和输出功率平稳连续变化,提高了系统稳定性。引入容量权重因子可以使各储能单元在工作过程中按容量进行功率分配,进而消除容量对 SOC 均衡的影响。

#### 参考文献

- [1] 颜浩. 微电网能量管理研究综述[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(13): 184-187, 190.
- [2] VUYYURU U, MAITI S, CHAKRABORTY C. Activepower low control between DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5712-5723.
- [3] 卢自宝, 龚莉, 赵传超, 等. 直流微电网中 DC-DC 变换器的切换控制方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 41(8): 202-209.
- [4] 张衡, 孙世宇, 谷志锋, 等. 独立式直流微电网中异构电池组均衡控制[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(10): 59-64.
- [5] 於跃, 高文根, 何飞帆, 等. 基于三频段分解的混合储能功率分配策略研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(9): 27-33.
- [6] 巫春玲, 程琰清, 刘智轩, 等. 一种改进的储能锂电池主动均衡拓扑研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(3): 32-37.
- [7] XU D, ZHANG W, JIANG B, et al. Directed-graph-observer-based model-free cooperative sliding mode control for distributed energy storage systems in DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(2): 1224-1235.
- [8] 米阳, 王鹏, 邓锦, 等. 孤岛交直流混合微电网群分层协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 1-8.
- [9] 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.
- [10] 王波, 张占营, 张霄, 等. 直流微电网分布式储能系统精确电流分配策略[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 96-103, 112.
- [11] 方炜, 徐朋, 刘晓东, 等. 直流微网储能系统 SOC 均衡及电压恢复[J]. 电气自动化, 2019, 41(2): 36-38, 58.
- [12] 芦紫微. 基于 SOC 下垂控制的多 DC 储能模块并联运行研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- [13] HAN B M. Battery SOC-based DC output voltage control of BESS in stand-alone DC microgrid[C]. 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON), 2016: 1445-1449.
- [14] HU R, WEAVER W W. DC microgrid droop control based on battery state of charge balancing[C]. 2016 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PE-CI), 2016.
- [15] 李留根, 刘道兵, 刘国霄. 多储能直流微电网荷电状态均衡控制策略[J]. 电力科学与工程, 2019, 35(4): 32-38.
- [16] 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.

#### 作者简介

崔关奇, 硕士, 主要研究方向为直流微电网协调控制策略。

E-mail: 1012368631@qq.com