

# 兼顾SOC均衡与电压偏差的自适应下垂控制策略

高纪新,朱建忠,韩笑,周彦成,徐婧

(南京工程学院 电力工程学院,江苏 南京 211167)

**摘要:**孤岛直流微电网中,线路阻抗与负荷波动导致功率分配不均和电压偏差,威胁系统稳定并影响储能寿命。现有下垂控制策略因需预设固定初始下垂系数,难以兼顾储能荷电状态(SOC)均衡精度与电压偏差抑制。针对此问题,提出一种基于LSHADE算法优化下垂参数的自适应控制策略。该策略采用分层结构:通信层利用一致性算法通过低带宽通信获取系统平均值;下垂控制层设计基于反正切函数的新型分配因子,并构建下垂系数与电压参考值的加权目标函数,应用LSHADE算法实时求解最优参数;直接控制层驱动DC/DC变换器。仿真结果表明,所提策略具有两大核心优势:首先无需预设初始下垂系数,消除传统方法的局限性;其次在功率受限场景下无需新增控制环节,可严格限制输出功率,而现有方案需附加复杂控制。在储能SOC初始差异(75%/73%/70%)及容量不同(5:5:3)时,SOC均衡偏差小于0.004%,母线电压偏差小于1%;负荷波动下电压波动仅0.9 V;变换器功率受限时(1 900 W),40 s内实现SOC均衡且功率不越限,显著优于需切换控制模式的传统策略。

**关键词:**直流微电网;荷电状态;电压偏差;下垂控制;分布式储能

**中图分类号:**TM721.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26667

## Adaptive Droop Control Strategy Combining SOC Equalization and Voltage Deviation

GAO Jixin, ZHU Jianzhong, HAH Xiao, ZHOU Yancheng, XU Jing

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, Jiangsu, China)

**Abstract:** In islanded DC microgrids, line impedance and load fluctuations lead to uneven power distribution and voltage deviation, threatening system stability and affecting energy storage lifetime. Existing droop control strategies need to preset a fixed initial droop coefficient, which makes it difficult to balance the storage state of charge (SOC) equalization accuracy and voltage deviation suppression. To address this problem, an adaptive control strategy based on the LSHADE algorithm to optimize the droop parameters was proposed. The strategy adopted a layered structure: the communication layer utilized the consistency algorithm to obtain the average value of the system through low-bandwidth communication; the droop control layer designed a new type of allocation factor based on the inverse tangent function, and constructed a weighted objective function of the droop coefficient and the voltage reference, and then solved the optimal parameter by applying the LSHADE algorithm in real time; the direct control layer drove the DC/DC converter. Simulation results show that the proposed strategy has two core advantages: firstly, there is no need to preset the initial droop factor, eliminating the limitations of the traditional methods; secondly, there is no need to add a new control link in power-constrained scenarios, and the output power can be tightly limited, while the existing schemes require complex additional control. In the case of initial difference in storage SOC (75%/73%/70%) and capacity (5:5:3), the deviation of SOC equalization is less than 0.004%, and the deviation of bus voltage is less than 1%; the voltage fluctuation under load fluctuation is only 0.9 V; in the case of power constraints of the converter (1 900 W), SOC equalization is achieved within 40 s and the power does not strictly go beyond the limit, which is significantly superior to the traditional strategy of switching control modes.

**Key words:** DC microgrid; state of charge (SOC); voltage deviation; droop control; distributed energy storage

**作者简介:**高纪新(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为新能源发电与储能,Email:1834431519@qq.com

21世纪,为了减小碳排放,保障能源供应,分布式发电能源以微电网的形式得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。然而分布式发电能源也有波动性和间歇性的缺点,尤其是微电网没有接入大电网时(孤岛微电网),供电系统会出现稳定性和可靠性不足的问题。对于这一问题,储能设备的加入可以很好地实现电能的跨时空存储与传输,从而保证孤岛微电网的供电可靠性。

微电网应用最广泛的均衡控制策略是下垂控制。下垂控制的优点是能够在无通信情况下完成各个分布式发电设备的功率分配,且容易满足负载即插即用的需求。但传统的下垂控制也有一定的局限性。其中最主要的问题是线路阻抗的存在会对分流精度造成不利影响,而如果增大下垂系数来提高功率分配的精度,电压偏差则会增大,由此可见功率分配与电压偏差存在固有矛盾。现有控制策略中,电压偏差问题能够通过补偿法改善。对此,文献[3]通过设计自适应下垂系数实现无功的精准分配与环流减小,一定程度上改善了功率分配与电压偏差的矛盾。文献[4]因为引入直流母线电压变化率来实现电压补偿,提高了分配精度。文献[5]通过自适应PI控制来调节下垂系数,能够适应负载的动态变化。以上文献研究了下垂控制的功率分配与电压偏差问题,但若使用储能设备还需要考虑不同设备SOC的差异以避免过充过放<sup>[6-7]</sup>。对此,文献[8]针对SOC均衡的需求,扩展下垂曲线到第二象限并引入系数 $n$ 来决定SOC均衡速度,但 $n$ 为自定义取值会使系统响应速度减慢。文献[9]将SOC与SOC均值之差作为下垂系数,由此设计的下垂系数会使在低SOC下的均衡速度减慢。文献[10-11]设计SOC与SOC均值之比的幂指数作为下垂系数,能够兼顾SOC均衡与系统稳定,在一定程度上减小了线路阻抗的不利影响,但较大的下垂系数会产生较大的电压偏差。文献[12]在母线电压跌落问题上进行了改进,通过测量母线电压及进行PI控制器计算,平移了下垂曲线,能够很好地维持母线电压,但增加了控制系统的复杂度。

综上所述,考虑线路阻抗的直流微网运行在孤岛模式时<sup>[13]</sup>,功率分配和电压偏差是一对矛盾,同时储能SOC的均衡与充放电功率的限制也需要考虑,避免出现储能部分单元退出供电的不利情况<sup>[14]</sup>。因此本文提出一种直流孤岛微网自适应下垂控制策略,在考虑线路阻抗和负载扰动下,

能够根据关联当前SOC与SOC平均值之比的反正切函数进行功率分配,通过建立功率与电压加权的综合优化目标函数,利用LSHADE(linear population size reduction success history based adaptive differential evolution)算法实时寻找下垂系数和电压参考值的最优解。该控制策略具有以下优点:1)与其他文献相比,使用智能算法选取下垂参数,避免了选取初始下垂系数的局限性。2)构建关联SOC与储能容量的分配因子,多储能设备并联运行时能够根据自身SOC调整分配比例实现自适应分配。3)考虑线路阻抗、负荷波动、变换器输出功率限制的场景,能够在各种工况下实时根据采样优化控制参数从而兼顾SOC分配与电压偏差。通过Matlab/Simulink建立仿真模型,验证了所提策略的正确性与有效性。

## 1 直流微电网与传统下垂控制

### 1.1 直流微电网

直流微电网由分布式发电设备、负载、储能和电力电子变换器构成<sup>[15]</sup>。常见的分布式发电设备有光伏发电设备、风力发电设备、燃料电池、潮汐能发电设备等,是直流微电网的根本的能量来源。因为分布式发电设备难以不间断供应,需要储能设备作为电能时空运输的介质,实现削峰填谷和稳定电压的作用。电力电子变换器如DC/AC和DC/DC实现电压与交直流的转换,是控制微电网运行状态变化的主要手段。微网结构如图1所示。

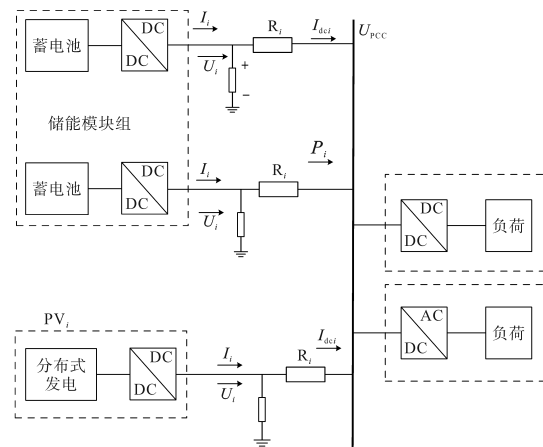


图1 直流微电网结构

Fig.1 DC microgrid structure

### 1.2 传统下垂控制

在孤岛直流微网中,下垂控制作为分布式电源之间实现自主功率分配的核心策略,无需通信

线路,只需设置下垂系数和参考电压,即可实现各单元的协调运行。下垂控制有两种形式:电压—电流( $U-I$ )下垂与电压—功率( $U-P$ )下垂。

电压—电流下垂控制的基本表达式为

$$U_i = U_{\text{ref}} - K_m I_m \quad (1)$$

式中: $U_{\text{ref}}$ 为额定参考电压; $K_m$ 为下垂系数, $\Omega$ ; $I_m$ 为输出电流。

该控制策略通过引入虚拟阻抗特性,使各单元根据本地电流测量值调节输出电压。当系统负载增加时,输出电流上升导致母线电压按比例下降,进而触发相邻单元功率的自动再分配。

电压—功率下垂控制的基本表达式为

$$U_i = U_{\text{ref}} - K_i P_i \quad (2)$$

式中: $K_i$ 为功率下垂系数, $V/W$ ; $P_i$ 为第*i*个电源单元输出给公共负载功率。

本文采用电压—功率下垂控制,如图2所示。通过实时计算本地功率值进行闭环调节,可实现更精确的功率分配。

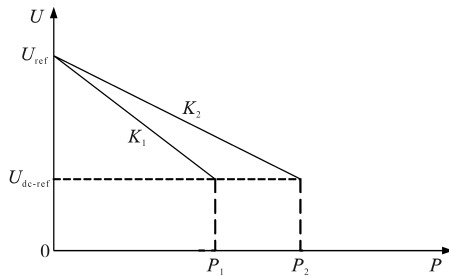


图2  $U-P$ 传统下垂曲线

Fig.2  $U-P$  traditional droop curve

当孤岛直流微网多个储能设备并联运行时,忽略线路阻抗和本地负载影响时,各储能线路上输出电压相等,即 $U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n$ 。

由式(2)易得:

$$K_1 P_1 = K_2 P_2 = K_3 P_3 = \dots = K_n P_n \quad (3)$$

那么任意两个储能设备为公共负载提供的输出功率之间满足以下关系:

$$\frac{P_i}{P_j} = \frac{K_j}{K_i} \quad (4)$$

由此可得输出功率与下垂系数成反比,通过改变下垂系数,即可改变线路输出功率的分配。

由下垂系数进行分配的功率分配会导致母线电压下降,由式(2)可得:

$$\frac{U_{\text{ref}} - U_i}{K_i} = \frac{\Delta U_{\text{dc}i}}{K_i} = P_i \quad (5)$$

式中: $\Delta U_{\text{dc}i}$ 为储能变换器输出端电压与母线电压的差值。

为了避免母线电压偏差过大,满足供电标准,需要合理设置 $K_i$ 大小以控制 $\Delta U_{\text{dc}i}$ 大小,如下式:

$$K_i \leq \frac{\Delta U_{\text{dc,max}}}{P_{N_i}} \quad (6)$$

式中: $\Delta U_{\text{dc,max}}$ 为允许的直流母线电压最大变化范围,本文取 $5\%U_{\text{ref}}$ ; $P_{N_i}$ 为储能设备额定输出功率。

综上所述,可知孤岛直流微网在不考虑线路阻抗和本地负载情况下,传统下垂控制能够在实现功率分配的同时兼顾电压偏差。但在实际的应用中因线路距离和材质不同,线路阻抗也不相同,所以线路阻抗的存在不能忽视。在中小规模的孤岛直流微网中,线路阻抗往往为阻性,因此本文不考虑线路阻抗的感性部分,将其视为纯电阻。

由图1可得,线路电流为

$$I_{\text{dc}i} = \frac{U_i - U_{\text{pcc}}}{R_i} \quad (7)$$

线路提供给公共母线的功率为

$$P_i = U_{\text{pcc}} I_{\text{dc}i} = \frac{U_{\text{pcc}}(U_i - U_{\text{pcc}})}{R_i} \quad (8)$$

将式(2)代入式(7)可得:

$$P_i = \frac{U_{\text{ref}} - U_{\text{pcc}}}{R_i/U_{\text{pcc}} + K_i} \quad (9)$$

此时,任意两个储能设备为公共负载提供的输出功率之间关系变为

$$\frac{P_i}{P_j} = \frac{R_j/U_{\text{pcc}} + K_j}{R_i/U_{\text{pcc}} + K_i} \quad (10)$$

式(10)相较于式(5),多了线路阻抗的影响,导致功率分配比值偏离预设的下垂系数比值,影响功率分配精确度<sup>[16]</sup>。

## 2 多储能SOC均衡

储能设备SOC是衡量可用容量的必要指标,根据常用的库伦计数法估算的SOC计算公式为

$$SOC_i = SOC_{i,0} - \frac{U_i \int_0^t I_{\text{dc}i}(t) dt}{U_{\text{bat},i} C_{\text{bat},i}} \quad (11)$$

式中: $SOC_i$ , $SOC_{i,0}$ 分别为第*i*个储能单元当前荷电状态和初始荷电状态; $U_{\text{bat},i}$ 为第*i*个储能单元端口电压; $C_{\text{bat},i}$ 为第*i*个储能单元的容量。

储能SOC的变化率可通过求导获得:

$$\frac{d(SOC_i)}{dt} = -\frac{U_i I_{\text{dc}i}}{U_{\text{bat},i} C_{\text{bat},i}} = -\frac{P_i}{U_{\text{bat},i} C_{\text{bat},i}} \quad (12)$$

因为储能容量为定值,储能端输出电压在短时间

内几乎不变,所以SOC变化率与输出功率强相关,当线路阻抗不匹配时,会导致SOC变化速率不一致。从而产生SOC偏差。因此有必要设计自适应调节策略实现SOC均衡的功率分配。

### 3 LSHADE 算法

本文通过智能算法选取下垂参数,需要对多目标取值问题计算最优值。出于全局寻优和高收敛速度的需要,需要采用合适的寻优算法。LSHADE算法是一种基于成功历史的新型智能算法,是基于差分进化(differential evolution, DE)的一个改进版本<sup>[17]</sup>,能够根据成功历史自适应更新控制参数,提高搜索效率与收敛速度。

历史成功经验动态调整控制参数 $F$ (缩放因子)和 $CR$ (交叉率),从而影响变异和交叉操作。控制参数 $F$ 和 $CR$ 的选择基于历史记忆池的内容。每一代中,通过随机选择历史记忆池中的一个索引,来生成当前个体使用的控制参数。第 $i$ 个个体的交叉率 $CR_i$ 表示如下:

$$CR_i = \begin{cases} 0 & \text{if } MCR_{ri} = \perp \\ \text{randni}(MCR_{ri}, 0.1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

$$F_i = \text{randci}(MF_{ri}, 0.1) \quad (14)$$

式中:randni(),randci()分别为生成在指定范围内的随机数函数,用来生成当前代个体的 $CR$ 和 $F$ 值;randci( $MF_{ri}$ ,0.1)为历史记忆中随机选择的缩放因子( $F$ )值; $F_i$ 为第 $i$ 个个体在当前代的缩放因子; $\perp$ 为设置的使该记忆值无效的终止值。

对于每个解,算法会通过随机选择种群中的其他解来生成一个新的“变异解”,它是通过以下公式生成的:

$$v_i = x_i + F \cdot (x_{\text{pbest}} - x_i) + F \cdot (x_{r1} - x_{r2}) \quad (15)$$

式中: $v_i$ 为变异解,表示第 $i$ 个个体的变异结果; $x_{\text{pbest}}$ 为当前种群的最优个体; $x_{r1}, x_{r2}$ 为随机选择的种群中的其他解。

变异向量 $v_i$ 经过交叉操作与父代个体混合,形成试验向量 $u_{ji}$ :

$$u_{ji} = \begin{cases} v_{ji} & \text{if } \text{rand}[0,1] \leq CR_i \text{ or } j = j_{\text{rand}} \\ x_{ji} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $v_{ji}$ 为第 $i$ 个个体的变异向量 $v$ 在第 $j$ 维上的值; $x_{ji}$ 为父代个体 $x$ 在第 $i$ 个个体的第 $j$ 维上的值;rand[0,1)为生成0到1的随机数; $j_{\text{rand}}$ 为随机选择的维度索引。

新解与当前解根据适应度优劣,择优选取生成下一代种群。

### 4 自适应下垂控制策略

由上文对传统下垂控制的论述可知,改变下垂系数可以改变功率分配比例,而电压偏差可以通过提高输出电压参考值使其减小。此外,储能SOC非线性变化对控制策略提出了更高要求。所以,如何实现储能系统下垂系数和输出电压参考值的自适应调整以上目标,是一项重要的研究课题。对此,本文通过将SOC引入功率偏差函数,并与电压偏差函数加权构成优化目标函数,通过LSHADE算法计算使综合偏差最小的最优解,将下垂系数与储能输出电压参考值反馈给控制系统实时优化。整体控制结构图如图3所示。

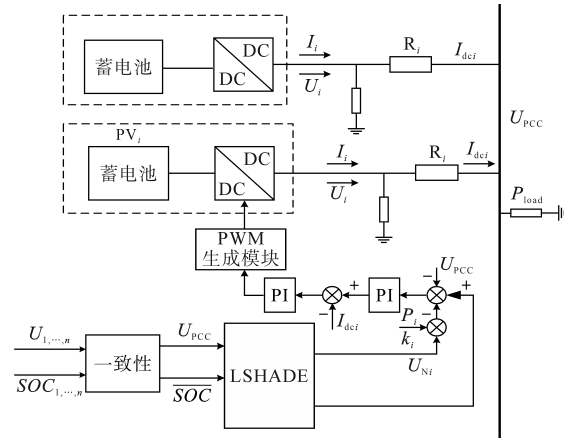


图3 整体结构图

Fig.3 Overall structure diagram

由式(9),定义任意一个储能单元为公共负载功率分配偏差函数:

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= \sqrt{(P_{\text{ave}} - m_i P_i)^2} \\ &= \sqrt{\left( P_{\text{ave}} - m_i \frac{U_{\text{ref}} - U_{\text{pcc}}}{R_i} \right)^2 \left( \frac{P_i}{U_{\text{pcc}}} + K_i \right)} \end{aligned} \quad (17)$$

其中

$$m_i = \frac{1}{CB_i} \frac{2}{\pi} \text{atan} [ x(\overline{SOC} - SOC_i) + 1 ] \quad (18)$$

式中: $P_{\text{ave}}$ 为期望储能单元承担公共负载输出功率的目标基准值; $m_i$ 为实时根据储能 $SOC_i$ 和 $\overline{SOC}$ 比值而动态变化的分配因子; $x$ 为储能收敛系数,关联SOC均衡速率。

由于母线电压无法直接测量,所以实际采用各线路 $U_i$ 取平均值的方式得到 $U_{\text{pcc}}$ 。所有储能设备之间通过一致性协议相互通信,交换 $SOC_i$ 和电压 $U_i$ 信息,由此得到平均值 $\overline{SOC}$ 和 $U_{\text{pcc}}$ <sup>[18]</sup>。

分配因子能够反映当前单元输出能力,输出

能力大的分配因子小,即可根据储能SOC大小分配对应储能单元的输出高低。通过 $P_{ave}$ 与 $m_i P_i$ 比较,可以判断期望与实际功率分配偏差大小。 $P_{ave}$ 基准值的选取需要考虑全局提高可靠性,各单元输出实时功率计算后得到下式:

$$P_{ave} = (m_1 P_1 + m_2 P_2 + m_3 P_3 + \dots + m_n P_n) / n \quad (19)$$

线路阻抗可由文献[19]的单脉冲扰动的线路阻抗测量方法和文献[20]基于载波信号的阻抗检测法测量得到,但这些方法对采样频率的要求十分严格。因此,通过式(9)代入上一时刻的下垂系数 $k'$ 可以计算出线路阻抗,如下式所示:

$$R'_i = \frac{U_{pcc}(U_{ref} - U_{pcc})}{P'_i} - k'_i U_{pcc} \quad (20)$$

由式(18)~式(20)可知,功率分配考虑了SOC均衡并且可以通过调节下垂系数 $k$ 来减小功率偏差,所以需要为每一个储能单元选取合适的 $k$ 使功率分配偏差接近于0,从而实现SOC均衡。从全局均衡的角度出发,需要统计全部的功率偏差,得到功率偏差函数为

$$P_{error} = \sqrt{(P_{ave} - \alpha_1 P_1)^2} + \sqrt{(P_{ave} - \alpha_2 P_2)^2} + \sqrt{(P_{ave} - \alpha_3 P_3)^2} + \dots + \sqrt{(P_{ave} - \alpha_n P_n)^2} \quad (21)$$

功率分配会引起电压偏差,需要对电压进行补偿,设置合适的电压参考值。所提出控制策略使用平均电压法构建母线电压偏差函数,使用LSHADE算法实时更新各单元输出电压参考值 $U_{Ni}$ 。

全局电压偏差函数如下式所示:

$$U_{error} = \sqrt{[U_{ref} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_{Ni} - K_i P_i)]^2} \quad (22)$$

由以上推导的功率与电压偏差函数,加权后得到兼顾SOC与电压偏差的优化目标函数如下式所示:

$$F(k_n, U_{Nn}) = c P_{error} + (1 - c) U_{error} \quad (23)$$

式中: $c$ 为代表SOC均衡的功率权重,取值需保证SOC均衡与电压偏差在允许范围内,优先考虑SOC均衡速度, $c$ 取0.982。

根据优化目标函数 $F(k_n, U_{Nn})$ ,利用LSHADE算法能够高效快速地找到目标函数极小值,输出使母线电压偏差和SOC偏差最小化的最优解,实时优化控制系统。寻找最优解的流程图如图4所示。

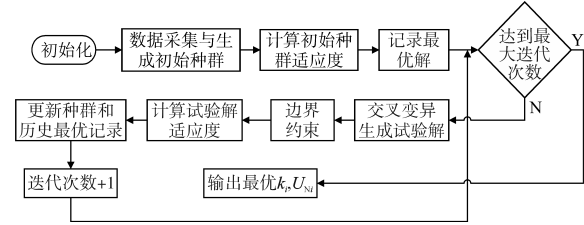


图4 LSHADE寻优流程图

Fig.4 LSHADE optimization flow chart

## 5 仿真实验

为了验证上述所提策略的有效性,通过Matlab/Simulink平台考虑线路阻抗与储能容量,以三组并联储能单元为例,研究在实现孤岛直流微网下实现储能设备SOC均衡与电压偏差优化,搭建仿真模型如图3所示。系统设置参数如表1所示。

表1 系统参数

Tab.1 System parameters

参数/单位	数值	参数/单位	数值
直流母线电压/kV	0.75	线路阻抗 $R_1/\Omega$	0.15
储能单元1容量/AH	1	线路阻抗 $R_2/\Omega$	0.2
储能单元2容量/AH	1	线路阻抗 $R_3/\Omega$	0.45
储能单元3容量/AH	0.6	初始恒功率负载/kW	2.7
储能单元额定电压/kV	0.5	输出端电容/F	0.06

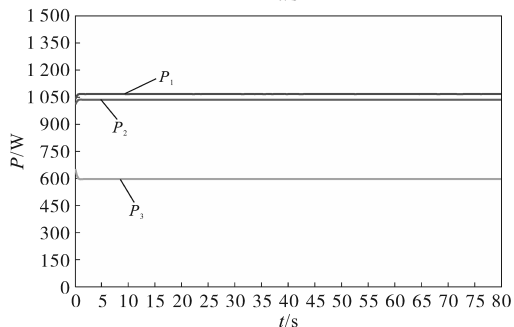
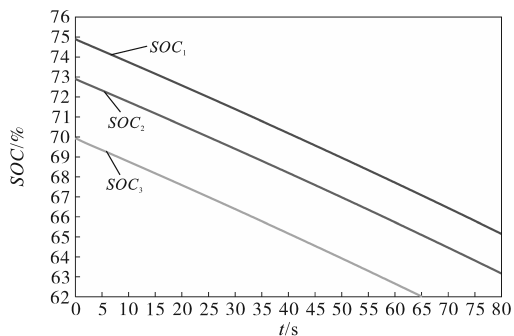
### 5.1 仿真一:传统下垂控制

储能单元的SOC分别为75%,73%,70%。容量比为5:5:3。传统下垂控制能够实现按容量比进行各储能单元的功率分配,但因未将SOC与下垂系数进行关联,无法实现SOC均衡,如图5所示。下垂系数影响功率分配效果与母线电压偏差,需要合理取值。当初始下垂系数过小时,功率分配会受到线路阻抗影响而无法实现按照容量比的精准分配。储能设备1与储能设备2容量相同,但在线路阻抗影响下存在50W的功率差,无法实现相同功率输出。

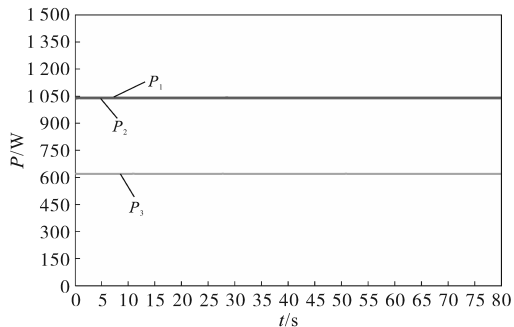
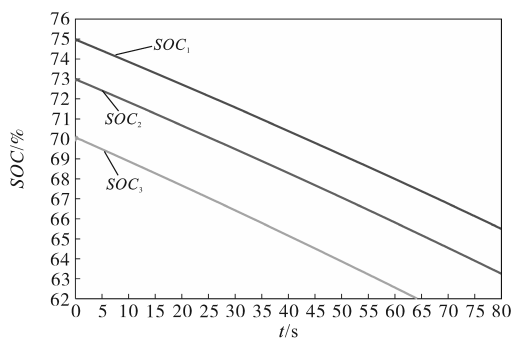
当初始下垂系数过大时,功率按照容量比精确分配, $P_1$ 与 $P_2$ 均为1050W, $P_3$ 为630W,这符合5:5:3的容量比。但母线电压产生了较大的跌落,影响电压质量,如图6所示。

### 5.2 仿真二:储能SOC不一致下正常放电

传统下垂控制方案无法满足SOC均衡的需要,现有策略通过将SOC与下垂系数关联实现对SOC的控制。本文通过对所提自适应下垂控制策略与文献[9]和文献[10]对比,证明所提控制策略的优越性。如图7所示,各方案均实现SOC均衡后线路功率按照容量比分配。



(a)小初始下垂系数传统下垂方案SOC与输出功率图



(b)大初始下垂系数传统下垂方案SOC与输出功率图

图5 传统下垂SOC与输出功率图

Fig.5 Conventional drooping SOC and output power plot

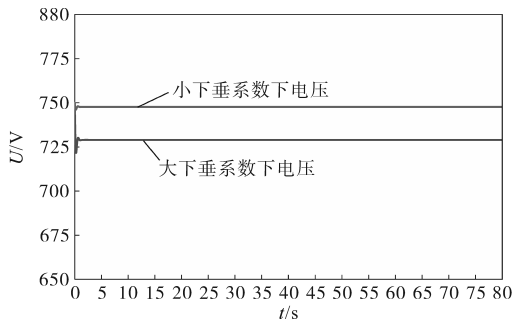
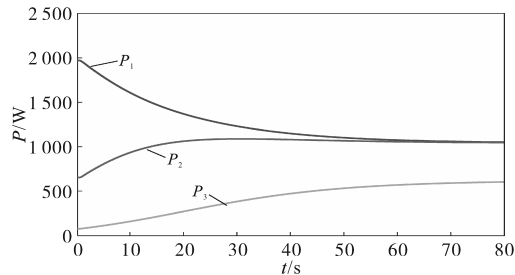
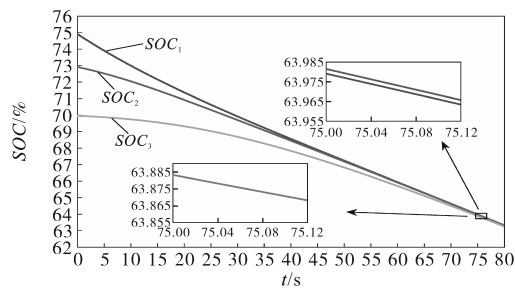
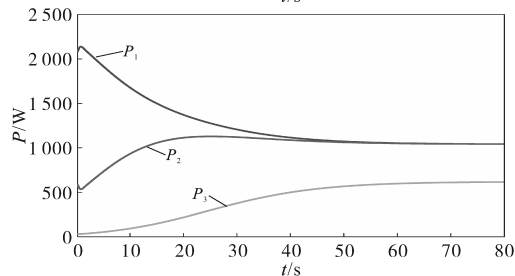
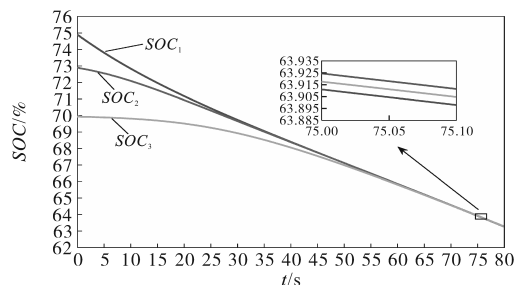


图6 传统下垂方案母线电压图

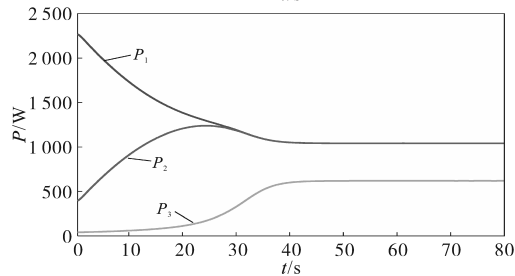
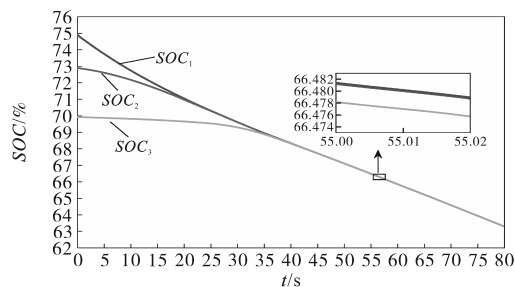
Fig.6 Bus voltage diagram for conventional drooping scheme



(a)文献[9]中SOC与输出功率图



(b)文献[10]中SOC与输出功率图



(c)算法寻优控制策略SOC与输出功率图

图7 改进策略SOC与输出功率图

Fig.7 Optimize strategy SOC and output power diagram

因为文献[9]和文献[10]采用直接使用公式设计下垂系数的方法,需要根据函数特性寻找合适的初始下垂系数。如果初始下垂系数过大,会使下垂系数变化裕度减小,并带来更大的电压偏差从而影响系统稳定性。如果初始下垂系数过小,则会影响SOC均衡效果,本方案无需寻找初始下垂系数,实时使用算法计算最优下垂参数,具有更好的实用性与兼容性。

因为文献[9]采用SOC的幂函数与平均值的幂函数作差的方式作为下垂系数,这会导致SOC高时储能设备下垂系数变化率大,所以储能单元1和储能单元2能够快速收敛。然而SOC降低会使下垂系数变化速率降低,导致储能设备3均衡速度不够,直到70 s时才基本均衡。SOC<sub>1</sub>与SOC<sub>2</sub>均衡效果很好,但SOC<sub>3</sub>仍存在偏差,偏差值为0.1%。在不附加二次补偿环节下母线电压降为737 V。

文献[10]通过设计平均值与SOC之比的幂函数作为下垂系数,避免了SOC减小导致下垂系数变化速率下降的弊端,在55 s时实现了基本收敛。但各单元SOC仍存在偏差,偏差值为0.007%。在不附加电压二次补偿环节下母线电压降为743 V。

所提自适应下垂控制策略设计的分配因子,仅作为目标分配功率之比,所以无需考虑分配因子大小。分配因子引入atan函数,使下垂系数变化更加平滑,适合算法实时计算的要求。并且在SOC变化过程中能够一直保证可靠的收敛速度,在40 s前实现了均衡,SOC<sub>1</sub>与SOC<sub>2</sub>均衡效果很好,同时SOC<sub>3</sub>偏差小于0.004%。如图8所示,本文控制策略母线电压降为745.2 V。在不附加电压二次补偿环节下母线电压能够保持在745 V以上,满足电压偏差小于5%的要求。与前两种控制策略对比,算法自动选取的下垂系数避免了传统SOC均衡需要设计初始下垂系数的局限性,增大了下垂系数变化范围,提高了均衡速度,并且提升了功率均衡效果,母线电压因为算法输出的参考电压变化也保证了较小的电压偏差。

### 5.3 仿真三:负荷波动

波动工况下初始恒功率负载设置为2 400 W,在第20 s时设置变为2 700 W,在第55 s时变为3 000 W,验证所提控制策略在SOC均衡前与SOC均衡后负荷发生波动工况下的有效性,效果如图9所示。在第40 s时实现了基本收敛,且50 s

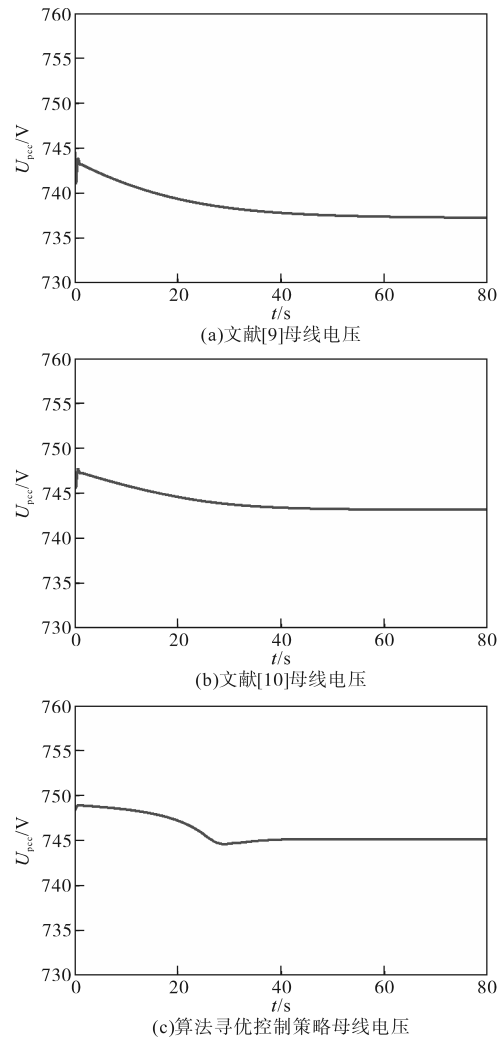


图8 母线电压图

Fig.8 Bus voltage diagrams

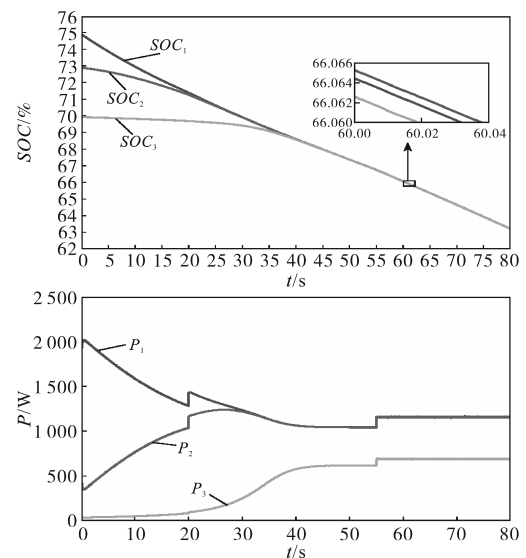


图9 负荷波动下算法寻优控制策略SOC与输出功率图

Fig.9 SOC and output power diagram of algorithm optimization control strategy under load fluctuation

时负荷波动对SOC均衡没有干扰,第60 s时各储

能单元 SOC 偏差值不超过 0.002%。如图 10 所示,母线电压从第 40 s 时的 745.2 V 下降到第 55 s 时的 744.3 V,只产生了 0.9 V 的下降,这是因为算法选取的变换器输出参考电压在负荷波动下能够根据偏差函数最优原则动态调整,从而很好地满足电压偏差要求。

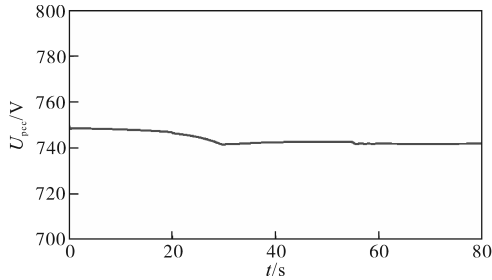


图 10 负荷波动下算法寻优电压曲线图

Fig.10 Algorithm optimization voltage curve under load fluctuation

### 5.4 仿真四:变换器最大功率限制

对于 DC/DC 变换器输出功率受限要求严格的场景,传统的 SOC 均衡控制策略已无法满足系统的稳定性需要,本文控制策略采取智能算法无需切换控制策略,通过在算法模块调整各单元下垂系数变化范围便可满足任意场景下变换器输出不超限的要求,提高了系统稳定性与响应速度。

若储能单元 1 变换器最大输出功率为 1 900 W。如图 11 和图 12 所示,本文控制策略能够在第 40 s 实现 SOC 均衡,且均衡后 SOC 偏差值小于 0.004%。储能单元输送功率最大值也由 2 300 W 降为 1 800 W,满足了变换器最大功率限制的需求,且不需要进行额外的控制策略切换,平滑且迅速地实现了 SOC 均衡与功率精确分配。功率曲线一开始由于算法上下限限制,下垂系数由固定的区间按分配因子的比例取值,在 SOC 偏差大时能够保证变换器输出功率不超限。而在第 25 s 后, SOC 偏差减小,各单元间需要的下垂系数之比减小,算法又能够在区间内根据偏差函数最优计算取值,保障了收敛的快速性与稳定性。如图 13 所示, SOC 偏差最大的储能单元 1 和储能单元 3 因为算法上下限限制, SOC 偏差大时保持在 12 倍的固定值,而在 SOC 逐渐减小到范围内后,算法计算更新下垂系数之比。储能单元 1 与储能单元 2 因为偏差小,所以它们的下垂系数之比能够一直变化,在 25 s 后,因为 SOC 偏差小,算法计算的下垂系数变化率加快,最终接近于 1,实现精准的功率分配。如图 12 所示,电压始终保持在 745 V 以上,符合电压偏差的要求。

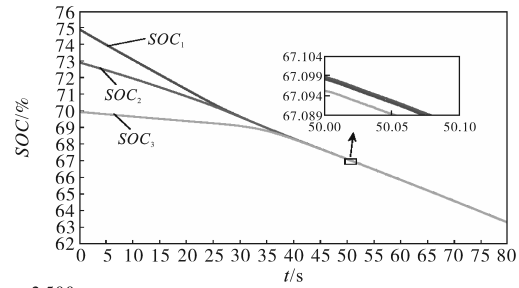


图 11 变换器最大功率限制下算法寻优控制策略 SOC 与输出功率图

Fig.11 SOC and output power diagram of algorithm optimization control strategy under maximum power limit of converter

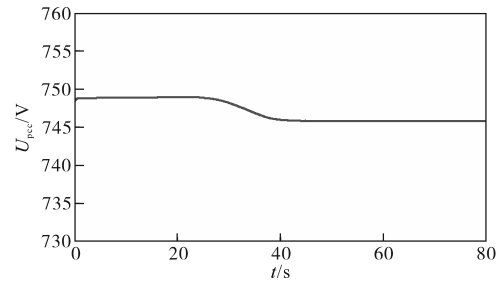


图 12 变换器最大功率限制下算法寻优控制策略电压曲线图

Fig.12 Voltage curve of algorithm optimization control strategy under maximum power limit of converter

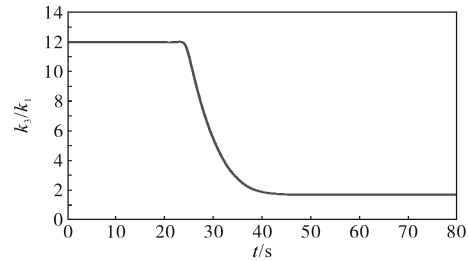


图 13 最大输出功率限制下算法寻优控制策略各储能单元下垂系数之比曲线图

Fig.13 The curves of the droop coefficient ratio of each energy storage unit under the maximum output power limit of the algorithm optimization control strategy

## 6 结论

本文针对孤岛直流微电网中线路阻抗与负荷波动导致的功率分配不均及电压偏差问题,提出一种基于LSHADE算法优化下垂参数的自适应控制策略。通过Matlab/Simulink仿真分析,主要结论如下:

1)在储能单元初始SOC存在差异(75%,73%,70%)和容量不同(5:5:3)条件下,所提策略40 s内实现了SOC偏差小于0.004%的高精度均衡,母线电压偏差控制在1%以内。

2)本文提出的控制策略通过LSHADE算法计算最优下垂参数,避免了人工选取初始下垂系数的局限性。

3)在功率受限场景下无需额外控制环节,系统42 s内仍能实现SOC高精度均衡,母线电压偏差控制在1%以内。

### 参考文献

- [1] LAMZOURI F E, BOUFONAS E M, El Amrani A. Efficient energy management and robust power control of a stand-alone wind-photovoltaic hybrid system with battery storage[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 42: 103044.
- [2] GHATHAN A M, MOHAMMED A, Al-HANBALI A, et al. Multi-objective optimization of a photovoltaic-wind-grid connected system to power reverse osmosis desalination plant[J]. Energy, 2022, 251: 123888.
- [3] 罗朝旭,刘洋,罗钦,等.基于动态下垂系数的低压微电网无功控制策略[J].电力建设,2022,43(1):78-86.  
LUO Chaoxu, LIU Yang, LUO Qin, et al. A reactive power control strategy for low-voltage microgrids based on dynamic sag factor[J]. Power Construction, 2022, 43(1): 78-86.
- [4] 秦磊,董海鹰,王润杰.基于卡尔曼滤波和模型预测控制的混合储能平抑风电功率波动策略[J].电网技术,2024,48(10):4286-4297.  
QIN Lei, DONG Haiying, WANG Runjie. Hybrid energy storage based on kalman filter and model predictive control to smooth out wind power fluctuation strategy[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4286-4297.
- [5] 魏茂华,杨苓,翁亮涛,等.考虑容量差异的孤岛直流微网分布式储能单元SOC均衡策略[J].上海交通大学学报,2025,59(3):376-387.  
WEI Maohua, YANG Ling, WENG Liangtao, et al. SOC balancing strategy for distributed energy storage units in isolated DC microgrids considering capacity differences[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2025, 59(3): 376-387.
- [6] 代丽,王君瑞,谭露,等.基于自适应下垂控制的光储直流微网控制策略研究[J].太阳能学报,2024,45(8):154-163.
- DAI Li, WANG Junrui, TAN Lu, et al. Research on control strategy of PV storage DC microgrid based on adaptive droop control[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(8): 154-163.
- [7] 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.
- [8] MOYA A P, PAZMINO P J, LLANOS J R, et al. Distributed secondary control for battery management in a DC microgrid[J]. Energies, 2022, 15(22): 8769-8788.
- [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 Pengcheng, ZHANG Chunjiang, YUAN Ranran, et al. Load current sharing method for distributed energy storage systems by improved SOC drooping control[J]. Proceeding of the CSEE, 2017, 37(13): 3746-3754.
- [10] 林嘉伟,王志新,张永.独立直流微电网中考虑不同容量的分布式储能系统能量控制策略[J].电力自动化设备,2020,40(10):139-146.  
LIN Jiawei, WANG Zhixin, ZHANG Yong. Energy control strategy of distributed energy storage system considering different capacities in independent DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 139-146.
- [11] 王凯,张继勇,杨树德,等.改进型分布式储能SOC自适应下垂控制[J].电气工程学报,2025,20(2):354-361.  
WANG Kai, ZHANG Jiyong, YANG Shude, et al. Improved adaptive droop control of distributed energy storage SOC[J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(2): 354-361.
- [12] 曾国辉,朱相臣,曾志伟,等.具有公共低压直流母线电压支撑功能的储能单元SOC自动均衡控制策略[J].中国电机工程学报,2022,42(19):7160-7170.  
ZENG Guohui, ZHU Xiangchen, ZENG Zhiwei, et al. Energy storage unit state-of-charge automatic equalization control strategy with common LVDC bus voltage support function[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7160-7170.
- [13] 董继军,陈浩,周雪松,等.直流微电网孤岛运行控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(17):115-121.  
DONG Jijun, CHEN Hao, ZHOU Xuesong, et al. Research on control strategy of a DC microgrid islanding operation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 115-121.
- [14] 陈波,李大华,王笋,等.基于改进下垂控制的储能单元控制策略研究[J].天津理工大学学报,2024,40(4):49-56.  
CHEN Bo, LI Dahua, WANG Sun, et al. Research on control strategy of energy storage unit based on improved droop control[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2024, 40(4): 49-56.
- [15] 刘辉,于思奇,孙大卫,等.构网型变流器控制技术及原理(下转第67页)

- tery capacity increment curve[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17): 5354-5364.
- [22] XU P, WANG C, YE J, et al. State-of-charge estimation and health prognosis for lithium-ion batteries based on temperature-compensated Bi-LSTM network and integrated attention mechanism[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(6): 5586-5596.
- [23] YAO J, NEUPERT S, KOWAL J. Cross-stitch networks for joint state of charge and state of health online estimation of lithium-ion batteries[J]. Batteries, 2024, 10, 171.
- [24] 张宇,周天宇,张永康,等.一种改进的CNN-Seq2Seq电池荷电与健康状态联合估计方法[J].电源学报,2026,24(1): 217-224.  
ZHANG Yu, ZHOU Tianyu, ZHANG Yongkang, et al. Joint estimation of battery SOC and SOH based on CNN-Seq2Seq neural network[J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(1): 217-224.
- [25] LI Y, LI K, LIU X, et al. A hybrid machine learning framework for joint SOC and SOH estimation of lithium-ion batteries assisted with fiber sensor measurements[J]. Applied Energy, 2022, 325: 119787.
- [26] 钱伟,王亚丰,王晨,等.基于BP神经网络与H $\infty$ 滤波的锂电池 SoH-SoC联合估计研究[J].仪器仪表学报,2024,45(6): 307-319.  
QIAN Wei, WANG Yafeng, WANG Chen, et al. Joint estimation of SoH-SoC for lithium battery based on BP neural network and H infinity filter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(6): 307-319.
- [27] ZHU Y, ZHU J, JIANG B, et al. Insights on the degradation mechanism for large format prismatic graphite/LiFePO $_4$  battery cycled under elevated temperature[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 60: 106624.
- [28] LIU Z, SIU W, CHAN Y. Reference based face super-resolution [J]. IEEE Access, 2019, 7: 129112-129126.

收稿日期:2025-10-20

修改稿日期:2025-11-25

(上接第57页)

- 述[J].中国电机工程学报,2025,45(1):277-297.  
LIU Hui, YU Siqu, SUN Dawei, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 277-297.
- [16] 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.  
WANG Bo, ZHANG Zhanying, ZHANG Xiao, et al. Accurate current sharing strategy for distributed energy storage system in DC microgrids[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 96-103, 112.
- [17] LI Y, HAN T, ZHOU H, et al. A novel adaptive L-SHADE algorithm and its application in UAV swarm resource configuration problem[J]. Information Sciences, 2022, 606: 350-367.
- [18] 杨丘帆,黄煜彬,石梦璇,等.基于一致性算法的直流微电网多组光储单元分布式控制方法[J].中国电机工程学报,2020,40(12):3919-3928.  
YANG Qiufan, HUANG Yubin, SHI Mengxuan, et al. Consensus based distributed control for multiple PV-battery storage units in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3919-3928.
- [19] 刘琛,赵晋斌,王闪闪,等.基于单脉冲注入的直流微电网线路阻抗检测[J].电工技术学报,2018,33(11):2584-2591.  
LIU Chen, ZHAO Jinbin, WANG Shanshan, et al. A line impedance identification based on single pulse injection in DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2584-2591.
- [20] 朱相臣,赵晋斌,曾国辉,等.基于载波频率的纹波分析直流微网阻抗检测及均流控制[J].中国电机工程学报,2020,40(21):6894-6903.  
ZHU Xiangchen, ZHAO Jinbin, ZENG Guohui, et al. An enhance droop control method with line impedance detection based on carrier frequency ripple analysis in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6894-6903.

收稿日期:2025-06-17

修改稿日期:2025-07-29