

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240707

## 光储直流微电网中光伏与储能单元控制策略研究

潘欢<sup>1,2</sup>, 宁显华<sup>1</sup>, 李峰<sup>1,2</sup>, 吴嘉欣<sup>1</sup>, 刘长金<sup>1</sup>

(1. 宁夏大学电子与电气工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏电力能源安全重点实验室, 宁夏 银川 750004)

**摘要:** 在光储孤岛直流微电网中, 需要最大化利用光伏发电, 通常对光伏系统采用最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)技术。但传统的 MPPT 控制速度慢、精度低, 特别是在局部阴影情形下极易陷入局部最优解。基于此, 首先提出一种将布谷鸟搜索算法与电导增量法相结合的混合 MPPT 控制。利用布谷鸟搜索算法快速全局寻优, 再使用电导增量法精确定位, 实现快速而准确地跟踪最大功率点。储能单元是光储直流微电网的重要组成部分, 其输出电流均分、荷电状态(state of charge, SoC)均衡和直流母线电压稳定是主要控制目标。但电流均分受线路电阻差异的影响, 进而影响 SoC 均衡和直流母线电压稳定, 于是设计一种新的电压电流双环控制策略以实现上述目标。该策略在电压外环采用母线电压作为反馈值, 在电流内环中设计了基于一致性算法的控制策略, 将 SoC 与指数函数结合并引入加速因子, 使得在充放电过程中实现 SoC 的快速均衡。所提控制策略既不需要下垂控制, 也无需二次补偿控制, 减轻了通信负担。最后在 Matlab/Simulink 中搭建直流微电网系统模型, 验证所设计新的混合 MPPT 控制和电压电流双环控制策略的有效性。

**关键词:** 直流微电网; 最大功率点跟踪控制; 电压电流双环控制; 电流均分; SoC 均衡

### Research on control strategies of PV and energy storage units in DC microgrids with PV-storage systems

PAN Huan<sup>1,2</sup>, NING Xianhua<sup>1</sup>, LI Feng<sup>1,2</sup>, WU Jiaxin<sup>1</sup>, LIU Changjin<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Ningxia Key Laboratory of Electrical Energy Security, Yinchuan 750004, China)

**Abstract:** In islanded DC microgrids with photovoltaic (PV) and energy storage systems, it is essential to maximize the utilization of PV generation, typically through maximum power point tracking (MPPT) techniques. However, traditional MPPT methods are often slow and imprecise, especially prone to failing into local optima under partial shadowing conditions. This paper proposes a hybrid MPPT control that combines the cuckoo search algorithm and the incremental conductance (INC) method. The cuckoo search algorithm is used for fast global optimization, followed by the INC method for accurate localization, enabling both rapid and precise tracking of the maximum power point. Energy storage units are crucial components in PV-storage DC microgrids, with key control objectives including equal output current sharing, state of charge (SoC) balancing, and DC bus voltage stability. However, current sharing is affected by differences in line resistance, which in turn affects the SoC balancing and DC bus voltage stability. Therefore, a novel voltage-current dual-loop control strategy is designed to achieve these objectives. The strategy uses the bus voltage as the feedback in the outer voltage loop and a control strategy based on the consistency algorithm is designed in the inner current loop, which combines the SoC with an exponential function and introduces an acceleration factor, enabling fast SoC balancing during charge/discharge cycles. The proposed control strategy eliminates the need for droop control and secondary compensation control, thus reducing communication burden. Finally, a DC microgrid system model is built in Matlab/Simulink to verify the effectiveness of the proposed hybrid MPPT and voltage-current dual-loop control strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62463026 and No. 52167006).

**Key words:** DC microgrid; maximum power point tracking control; voltage-current dual-loop control; equal current sharing; SoC balancing

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(62463026, 52167006); 宁夏自然科学基金项目资助(2022AAC05001); 中科院“西部之光”人才培养计划项目资助

## 0 引言

随着传统化石能源存储容量的逐年下降以及全球气候问题的日益严峻,以光伏(photovoltaic, PV)、风能等为代表的可再生能源发电得到了快速发展<sup>[1-3]</sup>。然而,分布式电源(distributed generation, DG)出力具有不确定性,直接并入交流大电网会对负载和电网产生不利影响。为了有效地利用 DGs,诞生了微电网的概念,它可将不同类型的 DGs 整合起来,以提高能源的利用率。与交流微电网相比,直流微电网更适合连接各种新型 DGs、电动汽车和直流型终端用户负载,其不需要频率、相位或无功功率调节<sup>[4-6]</sup>。凭借以上优势,直流微电网越来越受到青睐,具有更广阔的发展前景。

光储一体化直流微电网将 PV 和储能系统(energy storage system, ESS)结合,为负载提供电能,其中 PV 为主要供电单元,ESS 用于平抑功率波动。光储直流微电网中存在两大控制目标:1) PV 最大功率点输出;2) 储能单元(distributed energy storage unit, DESU)之间功率均衡。为了更多地利用太阳能,要求 PV 系统以最大功率点输出<sup>[7-9]</sup>,常采用的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制算法有扰动观察法(perturb and observe algorithms, P&O)<sup>[10]</sup>和电导增量法(incremental conductance method, INC)<sup>[11]</sup>。采用上述传统 MPPT 算法易找到最大功率点,但在局部阴影情形下却会陷入局部最优。为了解决局部阴影情况对 MPPT 的影响,学者们将一些具有全局搜索能力的智能算法应用于 MPPT 控制,如基于改进灰狼优化(grey wolf optimizer, GWO)算法的 MPPT 控制<sup>[12]</sup>、嵌入莱维飞行模块的 GWO 算法与 P&O 结合的 MPPT 控制<sup>[13]</sup>。然而,这些智能算法的收敛速度总是不尽人意。

在直流微电网中,ESS 对于稳压、功率平衡和效率优化至关重要。尤其当微电网独立运行时,ESS 是保障系统稳定的必要组件<sup>[14]</sup>,例如在光储直流微电网中,PV 提供能量,负载吸收功率,ESS 通过吸收或释放电能平衡系统功率<sup>[15]</sup>。直流微电网功率平衡与否直接体现在直流母线电压是否稳定。因此,必须控制母线电压稳定和 DESU 之间的负载电流按比例分配<sup>[16]</sup>。下垂控制具有控制简单和无需通信等优点,是实现上述目标的常用方法。根据不同电气参数间的关系,一般分为电压-电流(V-I)<sup>[17]</sup>和电压-功率(V-P)<sup>[18]</sup>下垂控制。然而,由于各变换器与直流母线之间线路电阻的差异<sup>[19]</sup>,不管哪种下垂控制都很难实现各变换器之间的输出电流精确分配。于是在下垂控制基础上,需要进一步设置二次控制对电

压偏差和电流不均衡进行补偿<sup>[20]</sup>。二次控制可以改善电压偏差,但却离不开通信网络和 PI 控制器的支持。为了降低线路电阻差异对电流均分的影响,文献[21]提出了一种检测线路电阻值的方法,利用线路电阻测量值设计新的下垂系数,提高电流均分精度。在实际电网运行中,线路电阻通常受到环境因素的影响,检测得到的线路电阻往往不能反映真实电阻值。当多个 DESU 并联时,除了实现各变换器的输出电流均分外,还需保持各 DESU 的荷电状态(state of charge, SoC)一致以避免过充或过放<sup>[22]</sup>。具体的控制原则是,若各 DESU 的初始 SoC 相同,则可一直保持 SoC 均衡运行;若初始状态不一致,则在放电时,SoC 高/低的 DESU 放电速率快/慢,充电时,SoC 低/高的 DESU 充电速率慢/快。目前的大多数 SoC 均衡策略是将均衡因子与下垂系数结合<sup>[23-26]</sup>,但是它们在收敛速度和均衡精度上往往会存在一些误差。

针对目前光储直流微电网研究中存在的不足,本文提出一种布谷鸟搜索(cuckoo search, CS)算法与电导增量法混合的 MPPT 控制,以实现快速、准确的 MPPT;设计一种新的电压电流双环控制,旨在实现 SoC 均衡、电流均分收敛快、精度高,并且使母线电压保持稳定。

## 1 直流微电网结构

本文以光储孤岛直流微电网为研究对象,结构如图 1 所示,主要由 PV 系统、ESS 和负载组成,系统正常运行时需满足如式(1)所示功率平衡条件。

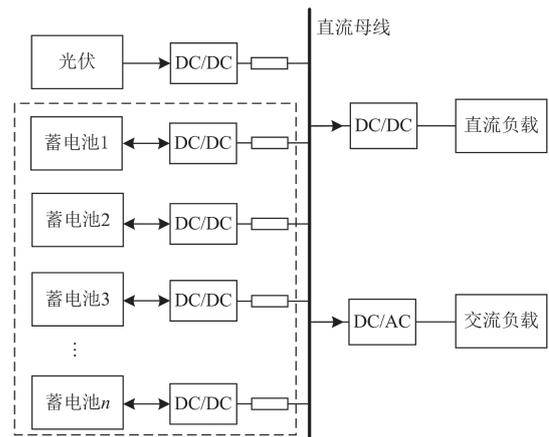


图 1 直流微电网结构

Fig. 1 DC microgrid structure

$$P_{\text{ESS}} + P_{\text{PV}} = P_{\text{load}} + P_{\text{loss}} \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{ESS}}$  可正可负, 正表示 DESU 输出功率, 负表示 DESU 吸收功率;  $P_{\text{PV}}$  为 PV 阵列输出功率;  $P_{\text{load}}$

为负载功率;  $P_{\text{loss}}$  为变换器功率损耗, 简单起见本文假设  $P_{\text{loss}} = 0$ 。

图 1 中箭头指示能量流向, 其中 PV 系统通过单向变换器并联至直流母线, 作为微电网中唯一的能量来源。由蓄电池构成的 DESU 通过双向变换器并联至直流母线, 主要作用是存储或释放电能: 当  $P_{\text{PV}} > P_{\text{load}}$  时, ESS 处于充电状态, 反之则处于放电状态; 除此之外, ESS 还可快速响应系统功率变化, 平抑功率波动, 使系统稳定性得到保证; 负载仅消耗电能, 系统正常运行时, PV、ESS 和负载三者之间的能量处于一个动态平衡的过程。

## 2 光伏系统建模

### 2.1 局部阴影情形

在实际应用中, 为了获得更高的输出功率, 通常将 PV 电池串、并联在一起形成 PV 阵列, 如图 2 所示。当 PV 阵列辐照面积较大时, 云层、树枝、鸟粪便遮挡及模块缺陷等情况会使得阵列出现局部阴影, 进而造成不同部位的辐照强度不一致。在图 2 所示的  $N_s \times N_p$  PV 阵列中, 由于局部阴影的影响, 每列受到的辐照强度不同。此时, PV 阵列输出功率曲线不再是单峰值, 而会呈现多峰值。

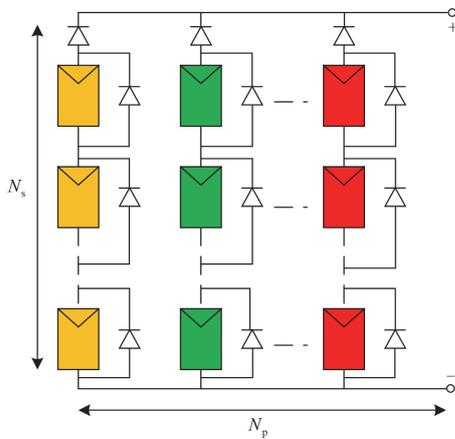


图 2 光伏阵列  
Fig. 2 PV arrays

### 2.2 光伏阵列输出特性

单二极管模型因其结构简单、易于实现而被广泛用于模拟实际 PV 组件的特性。PV 组件可简化为由一个电流源和并联的正向导二极管组成的电路, 因此图 2 的 PV 阵列对应的等效电路如图 3 所示。其中:  $I_{\text{ph}}$  为光生电流;  $N_s$  和  $N_p$  分别为串、并联的 PV 模块数量, 每个模块由  $N$  个 PV 电池组成;  $R_s$  和  $R_q$  分别为串、并联电阻;  $I_{\text{PV}}$  和  $U_{\text{PV}}$  分别为 PV 阵列输出电流和电压。

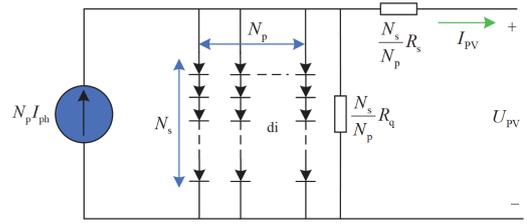


图 3 光伏阵列等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of photovoltaic array

图 3 中的 PV 阵列输出电流表示为<sup>[27]</sup>

$$I_{\text{PV}} = N_p \left[ I_{\text{sc},n} - I_{0,n} \left( \exp \left( \frac{U_{\text{PV}}}{N_s a U_t} \right) - 1 \right) \right] \quad (2)$$

式中:  $I_{\text{sc},n}$  为第  $n$  个 PV 模块的短路电流;  $I_{0,n}$  为第  $n$  个二极管的反向饱和电流或漏电流;  $U_t$  为热电压,  $U_t = NK T/q$ , 其中  $K$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为二极管 p-n 结的温度,  $q$  为电子电荷;  $a$  为二极管理想性常数。

PV 阵列的输出功率  $P_{\text{PV}}$  如式(3)所示。

$$P_{\text{PV}} = N_p U_{\text{PV}} \left[ I_{\text{sc},n} - I_{0,n} \left( \exp \left( \frac{U_{\text{PV}}}{N_s a U_t} \right) - 1 \right) \right] \quad (3)$$

在均匀光照和局部阴影情形下的 P-V 输出特性曲线如图 4 所示。在局部阴影时, PV 阵列的输出功率出现了多个峰值, 当采用传统的 MPPT 算法时, 很容易落到局部的最大功率点, 无法实现全局 MPPT。

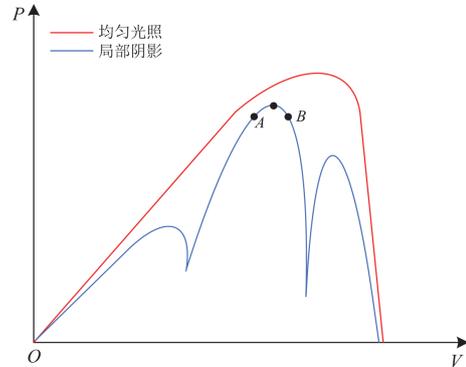


图 4 光伏阵列 P-V 输出特性曲线

Fig. 4 Photovoltaic array P-V output characteristic curve

### 2.3 布谷鸟算法+电导增量法的 MPPT 控制

INC 因具有精确的最大功率点定位优势而被广泛采用, 但也存在两个明显的缺点: 1) 受追踪步长的影响导致寻找最大功率点时间较长; 2) 当 PV 阵列处于局部阴影下, 会出现跟踪到局部最优值的情形。基于此, 将 CS 算法与 INC 结合, 以弥补 INC 的缺点。

CS 算法是一种模拟布谷鸟孵化行为的群体智

能优化算法, 利用莱维飞行进行全局搜索, 具有良好的全局寻优能力。CS+INC 的 MPPT 控制策略先使用 CS 算法进行全局功率点搜索, 在接近最大功率点附近时再切换为 INC 进行精确定位。在图 4 局部阴影情况下的 P-V 特性曲线中, A、B 点以下位置采用 CS 算法进行搜索, A、B 点以上位置由 INC 控制。CS 算法与 INC 结合, 发挥各自的优势, 使得 MPPT 快速而准确。CS + INC 的 MPPT 控制原理如下所述。

1) 在 CS 算法搜索阶段, 检测 PV 阵列输出电压和电流值; 将两者相乘后的功率作为 CS 鸟巢的适应度; 依据莱维飞行和弃巢率来更新适应度, 输出最优巢穴位置即为对应占空比。

2) 在最大功率点附近切换为 INC 控制, 以 CS 算法迭代后的功率为判断起点。在 CS 算法和 INC 切换过程中, 需设计切换阈值。阈值设计依据为鸟巢间的最大距离差  $\xi$ , 即小于  $\xi$  时两个算法进行切换, 本文取  $\xi = 0.03$ 。除此之外, 还需要设置 MPPT 算法终止条件, 即当前功率点和前一刻功率点之差, 本文设置为 0.005。

### 3 储能系统控制

#### 3.1 DESU 功率均分策略

ESS 由多个 DESU 组成, 各 DESU 通过 Boost-Buck 变换器并联至 DC 母线, 其电路拓扑如图 5 所示。其中:  $U_{bat}$ 、 $U_{dc}$  和  $U_b$  分别表示 DESU 电压、变换器输出电压和母线电压;  $S_1$  和  $S_2$  为控制开关;  $L$ 、 $C$  和  $R_{line}$  分别为电感、电容和线路电阻。通过控制开关  $S_1$  和  $S_2$  的开断状态, 可控制 DESU 运行于 Boost 模式或 Buck 模式。当开关  $S_1$  处于断开状态, 开关  $S_2$  可断开亦可闭合, 此时 DESU 运行于 Buck 模式; 当开关  $S_2$  处于断开状态, 开关  $S_1$  可断开亦可闭合, 此时 DESU 运行于 Boost 模式。

假设 DESU 运行于 Boost 模式, 由图 5 可得

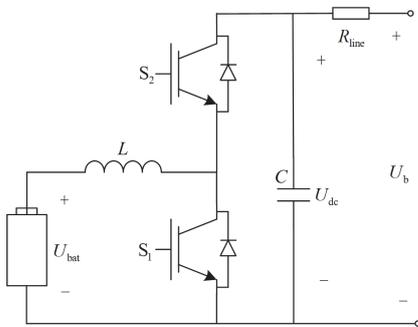


图 5 DESU 电路拓扑结构  
Fig. 5 DESU circuit topology

$$U_{dc} = I_{dc} R_{line} + U_b \quad (4)$$

式中:  $I_{dc}$  为变换器输出电流。

以控制母线电压值和变换器输出电流为目的, 通常采用如图 6 所示的电压电流双环控制。图 6 中,  $U_{ref}$  为直流母线电压参考值;  $I_{refi}$  为电压外环输出电流值, 也是变换器的参考电流值;  $I_{Li}$  为 DESU 输出电流值;  $U_{dci}$  为电压外环的反馈值; 下标 “i” 表示第 i 个变换器; 电流内环输出为 PWM 信号, 用以控制开关  $S_1$ 、 $S_2$  的状态。

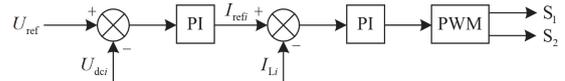


图 6 电压电流双环结构

Fig. 6 Voltage-current dual-loop structure

由图 6 可知, 双环控制虽然能使变换器输出电压稳定在母线电压参考值附近, 但由式(4)可得每个变换器至母线间的线路电阻  $R_{linei}$  存在差异, 会导致各变换器输出电流不能按比例分配。于是提出了 V-I 下垂控制以解决输出电流均分问题, 如下所述。

$$U_{dci}^* = U_{ref} - I_{dci} R_{di} \quad (5)$$

式中:  $U_{dci}^*$  为第 i 个变换器经下垂控制后的输出电压;  $R_{di}$  为下垂系数。

V-I 下垂控制的结构框图如图 7 所示。若设置较大的下垂系数, 变换器输出电流均分效果较好, 但母线电压偏差会增大; 反之若设置较小的下垂系数, 则母线电压偏差较小, 但电流均分效果会变差。于是, 需要在 V-I 下垂控制添加二次补偿, 相应的结构框图如图 8 所示。

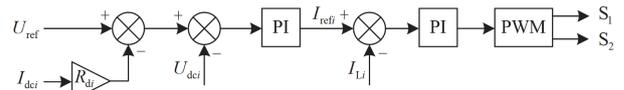


图 7 下垂控制结构框图

Fig. 7 Droop control structure diagram

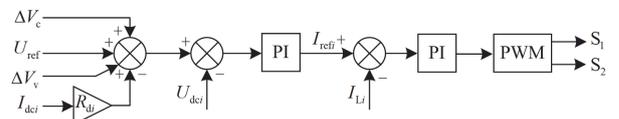


图 8 含有二次补偿的下垂控制结构框图  
Fig. 8 Droop control structure diagram with secondary compensation

$$U_{dci}^* = U_{ref} - I_{dci} R_{di} + \Delta V_v + \Delta V_c \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta V_v = G_v(s)(U_{ref} - \bar{U}_{dci}) \\ \Delta V_c = G_c(s)(I_{dci} - \bar{I}_{dci}) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $G_v(s)$  和  $G_c(s)$  为 PI 控制传递函数;  $\bar{U}_{dci}$  和  $\bar{I}_{dci}$

分别为所有 DESU 变换器输出的平均电压和平均电流值。

式(6)、式(7)为含二次补偿 V-I 下垂控制, 尽管可以有效地稳定直流母线电压、提高电流均分效果, 但代价是增加了 2 个 PI 控制器, 使得控制参数增多, 控制复杂度提升; 此外还需要一个中央控制器采集每个 DESU 变换器的输出电压与电流, 计算它们的平均值, 这对系统的安全运行存在隐患。

针对含二次补偿 V-I 下垂控制的不足, 本文设计一种简单的电压电流双环控制策略。在传统的三环控制中, 电压外环的反馈值为变换器输出电压, 受到线路电阻和下垂系数等影响, 必然导致各变换器的输出电压各不相同, 从而使得电流内环的输入参考电流值各不相同, 这是导致各变换器输出电流不能均分的原因。为此, 本文将全局变量  $U_b$  作为电压外环的反馈值, 将母线电压参考值与母线电压实际值  $U_b$  作差, 再通过 PI 控制器调节, 即可使得电流内环的参考值按比例分配 ( $I_{ref1} = I_{ref2} = \dots = I_{refi}$ ), 最终使变换器按比例均分输出电流。同时, 将  $U_b$  作为电压外环的反馈值, 可以让  $U_b$  精准地跟踪参考值, 无需采用二次电压补偿控制。所设计的电流均分控制策略结构如图 9 所示。

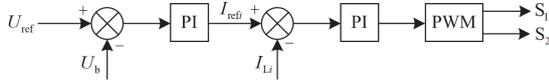


图 9 电流均分控制策略结构

Fig. 9 Current equalization control strategy structure

### 3.2 SoC 均衡控制策略

当光储孤岛直流微电网正常运行时, 为了避免 DESU 过度充放电而缩短使用寿命, 需要确保各 DESU 的 SoC 保持一致。通常采用安时积分法计算 SoC, 如式(8)所示<sup>[28]</sup>。

$$S_{OCi}(t) = S_{OCi_0} - \frac{1}{C_{bati}} \int I_{Li} dt \quad (8)$$

式中:  $S_{OCi}(t)$  为第  $i$  组 DESU 在  $t$  时刻的荷电状态;  $S_{OCi_0}$  为第  $i$  组 DESU 的初始荷电状态;  $C_{bati}$  为第  $i$  组 DESU 的容量。

式(8)关于时间  $t$  求导, 得到第  $i$  组 DESU 的 SoC 变化速率  $S'_{OCi}(t)$  为

$$S'_{OCi}(t) = -\frac{I_{Li}}{C_{bati}} \quad (9)$$

由式(9)可知, DESU 的 SoC 变换速率取决于  $C_{bati}$  和  $I_{Li}$ 。一般情况下, 各 DESU 的  $S_{OCi_0}$  并不相同, 若仅仅采用图 9 所示电压电流控制, 并不会使

各  $S_{OCi}(t)$  趋于一致。于是, 在图 9 的基础上需要加入必要的 SoC 均衡控制策略。具体方法为: 在电流内环的输入参考电流中添加基于 SoC 的增益函数  $f(S_{OCi})$ , 其表达式为

$$f(S_{OCi}) = e^{k\alpha(S_{OCi} - \bar{S}_{OCi})}; k \in \{-1, 1\} \quad (10)$$

$$\bar{S}_{OCi}(t) = S_{OCi}(t) + a_s \int_0^t \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\bar{S}_{OCj}(\tau) - \bar{S}_{OCi}(\tau)) d\tau \quad (11)$$

式中:  $k$  为充放电状态调整系数, DESU 处于充电状态时,  $k = -1$ , DESU 处于放电状态时,  $k = 1$ ;  $\alpha$  为 SoC 均衡加速因子;  $\bar{S}_{OCi}(t)$  为第  $i$  个 DESU 的平均 SoC 估计值;  $a_s$  为平均 SoC 动态一致性增益;  $N_i$  为第  $i$  个 DESU 的邻居集合;  $a_{ij}$  为 DESU 之间的通信连接增益, 若第  $i$  个 DESU 与第  $j$  个 DESU 有通信,  $a_{ij} = 1$ , 否则  $a_{ij} = 0$ 。为节约通信资源, 本文采用多智能体一致性算法得到  $\bar{S}_{OCi}(t)$ <sup>[26]</sup>。含有 SoC 均衡策略的电压电流双环控制结构如图 10 所示。

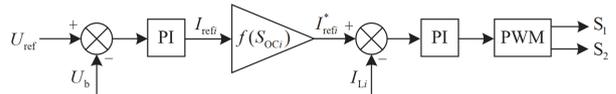


图 10 含有 SoC 均衡作用的双环控制策略结构

Fig. 10 Structure of a dual-loop control strategy with SoC equalization role

由图 10 可知, 加入  $f(S_{OCi})$  后, 电流内环的参考电流变为

$$I_{refi}^* = I_{refi} e^{k\alpha(S_{OCi} - \bar{S}_{OCi})} \quad (12)$$

因此, 当 DESU 处于充电状态时,  $S_{OCi}$  大的  $I_{refi}^*$  越小, 而  $S_{OCi}$  小的  $I_{refi}^*$  越大, 即,  $S_{OCi}$  大的充电少, 而  $S_{OCi}$  小的充电多, 当所有  $S_{OCi}$  相同时  $I_{refi}^*$  也相同, 最终同步实现 SoC 均衡和电流均分。反之, 当 DESU 处于放电状态时, 情形刚好相反。

## 4 稳定性分析

为了保证在所提 ESS 控制策略下光储直流微电网系统保持稳定, 需对所提出的控制策略进行稳定性分析<sup>[29-30]</sup>。为简化分析, 以两个等容量的 DESU 并联系统为例, 绘制根轨迹图。

由图 5 可知, 假设蓄电池输出电流方向为正, 可以得到状态方程为

$$U_{bati} = L \frac{dI_{Li}}{dt} + RI_{Li} + (1 - d_i)U_{dci} \quad (13)$$

式中:  $d_i$  为控制策略输出的占空比, 用于调节变换器的开关状态。电压环与电流环均采用 PI 控制, 即  $G_V(s) = (k_{vp} + k_{vi}/s)$ ,  $G_C(s) = (k_{cp} + k_{ci}/s)$ , 其中  $k_{vp}$

和  $k_{vi}$  分别为电压环比例系数和积分系数,  $k_{cp}$  和  $k_{ci}$  分别为电流环比例系数和积分系数。于是, 电流参考值、占空比可分别表示为

$$I_{refi} = (U_{ref} - U_{dci})G_V(s) \quad (14)$$

$$d_i = (I_{refi}^* - I_{Li})G_C(s) \quad (15)$$

为简便计算, 指数函数  $e^x$  的泰勒级数展开式可以近似表示为  $e^x = 1 + x$ , 于是式(12)可表示为

$$I_{refi}^* = I_{refi}(1 + k\alpha(S_{OCi} - \bar{S}_{OCi})) \quad (16)$$

将扰动量引入式(13)可得到系统线性化的扰动方程为

$$\begin{cases} (1-D_1)\hat{U}_{dc} - U_{dc}\hat{d}_1 + (sL+R)\hat{I}_{L1} = 0 \\ (1-D_2)\hat{U}_{dc} - U_{dc}\hat{d}_2 + (sL+R)\hat{I}_{L2} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中: 符号“ $\hat{\cdot}$ ”表示扰动量;  $D_1$ 、 $D_2$  表示稳态下的占空比; 为简便计算使  $U_{dc} = U_b$ , 即和母线电压相等。

将扰动量代入式(15)和式(16), 整理可得

$$\hat{d}_i = \begin{cases} \hat{I}_{refi}[1 + k\alpha(S_{OCi} - \bar{S}_{OCi})] + \\ I_{refi}k\alpha(\hat{S}_{OCi} - \bar{S}_{OCi}) - \hat{I}_{Li} \end{cases} G_C(s) \quad (18)$$

$$\hat{I}_{refi} = -\hat{U}_{dci}G_V(s) \quad (19)$$

式中,  $I_{refi}$  为初始电流基准值。

将扰动量代入式(11), 可得

$$\begin{cases} \hat{S}_{OC1} = \hat{S}_{OC1} + \frac{a_s}{s}(\hat{S}_{OC2} - \hat{S}_{OC1}) \\ \hat{S}_{OC2} = \hat{S}_{OC2} + \frac{a_s}{s}(\hat{S}_{OC1} - \hat{S}_{OC2}) \end{cases} \quad (20)$$

对式(20)整理可得

$$\begin{cases} \hat{S}_{OC1} = \frac{s+a_s}{s+2a_s}\hat{S}_{OC1} + \frac{a_s}{s+2a_s}\hat{S}_{OC2} \\ \hat{S}_{OC2} = \frac{s+a_s}{s+2a_s}\hat{S}_{OC2} + \frac{a_s}{s+2a_s}\hat{S}_{OC1} \end{cases} \quad (21)$$

将扰动量代入式(8), 得到  $s$  域中 SoC 扰动值为

$$\hat{S}_{OCi} = -\frac{\hat{I}_{Li}}{sC_{bati}} \quad (22)$$

将式(21)、式(22)代入式(18), 可得到占空比的扰动值为

$$\begin{cases} \hat{d}_1 = \left\{ \begin{aligned} & \hat{I}_{ref1}[1 + k\alpha(S_{OC1} - \bar{S}_{OC1})] - \\ & \left[ 1 + \frac{k\alpha a_s I_{ref}}{(s+2a_s)sC_{bat}} \right] \hat{I}_{L1} + \frac{k\alpha a_s I_{ref}}{(s+2a_s)sC_{bat}} \hat{I}_{L2} \end{aligned} \right\} G_C(s) \\ \hat{d}_2 = \left\{ \begin{aligned} & \hat{I}_{ref2}[1 + k\alpha(S_{OC2} - \bar{S}_{OC2})] - \\ & \left[ 1 + \frac{k\alpha a_s I_{ref}}{(s+2a_s)sC_{bat}} \right] \hat{I}_{L2} + \frac{k\alpha a_s I_{ref}}{(s+2a_s)sC_{bat}} \hat{I}_{L1} \end{aligned} \right\} G_C(s) \end{cases} \quad (23)$$

将式(19)、式(23)代入式(17), 得到系统特性方程为

$$\begin{aligned} & b_8 s^8 + b_7 s^7 + b_6 s^6 + b_5 s^5 + b_4 s^4 + \\ & b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s^1 + b_0 = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

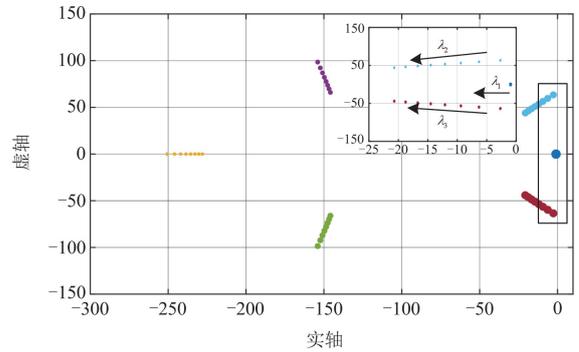
式中: 系数  $b_0 - b_8$  见附录 A。

为了分析系统的稳定性, 参数取值由表 1 给出, 将参数代入式(24), 绘制系统根轨迹如图 11—图 13 所示。

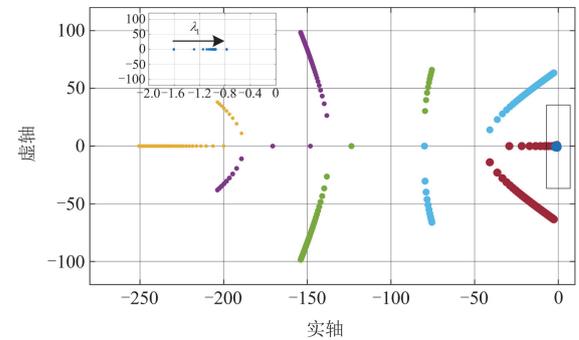
表 1 稳定性分析参数取值

参数	数值
母线参考电压 $U_{ref}/V$	400
$C_{bat}/Wh$	20
初始电流参考值 $I_{ref}/A$	10
外环电压控制器 $G_V$	2 + 10
内环电流控制器 $G_C$	1 + 80
平均动态一致性增益 $a_s$	100
变换器滤波电感 $L/mH$	0.2
电感等效电阻 $m\Omega$	1

由式(24)可知, 该系统共有 8 个极点, 其中两个极点位于离虚轴较远位置, 因此图 11—图 13 中



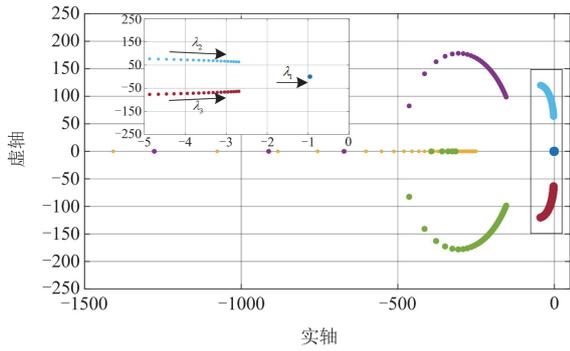
(a)  $k_{vp}$  增加时的根轨迹



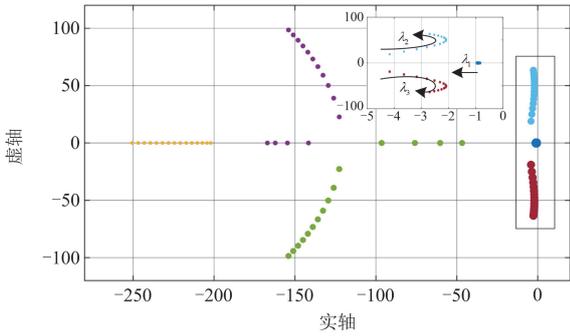
(b)  $k_{vr}$  增加时的根轨迹

图 11 电压环 PI 参数变化时根轨迹图

Fig. 11 Root locus diagram when voltage loop PI parameters change



(a)  $k_{cp}$ 增加时的根轨迹



(b)  $k_{ci}$ 增加时的根轨迹

图 12 电流环 PI 参数变化时根轨迹图

Fig. 12 Root locus diagram when current loop PI parameters change

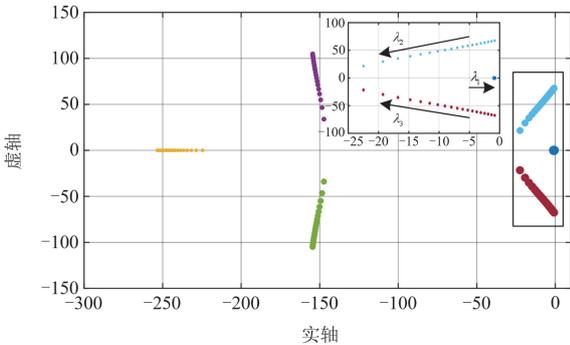


图 13 加速因子  $\alpha$  变化时根轨迹图

Fig. 13 Root locus diagram when acceleration factor  $\alpha$  changes

未显示这两个极点。下面将分析靠近虚轴的 3 个主导极点的情况。

图 11(a)中  $k_{vp}$  以 0.4 的步长由 2 增加到 5, 3 个主导极点  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  逐渐远离虚轴, 系统稳定裕度增强; 图 11(b)中  $k_{vi}$  以 0.2 的步长由 0.2 增加到 10, 主导极点  $\lambda_1$  靠近虚轴方向, 系统稳定裕度降低。

图 12(a)中  $k_{cp}$  以 0.02 的步长由 0.02 增加到 1,

3 个主导极点  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  靠近虚轴, 系统稳定裕度逐渐降低; 图 12(b)中  $k_{ci}$  以 5 的步长由 10 增加到 80, 3 个极点  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  远离虚轴, 系统稳定裕度增强。

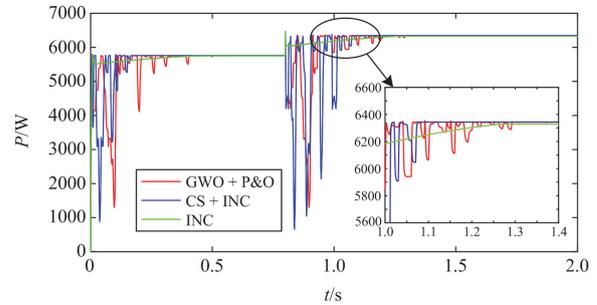
图 13 中加速因子  $\alpha$  以 3 的步长由 6 增加到 60, 主导极点  $\lambda_1$  向虚轴方向运动, 可知系统稳定裕度逐渐降低。

通过对图 11—图 13 的分析, 可以确定选择较大的  $k_{vp}$  与较小的  $k_{vi}$ 、较小的  $k_{cp}$  与较大的  $k_{ci}$ 。虽然  $\alpha$  值较大不利于系统稳定, 但较大的  $\alpha$  值可以加快 SoC 间的均衡, 综合考虑本文取  $\alpha = 50$ 。

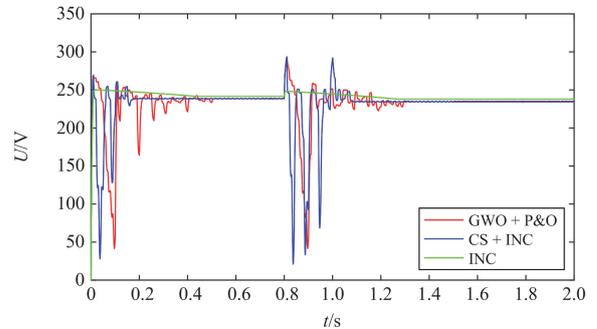
## 5 仿真验证与分析

### 5.1 光伏系统 MPPT 控制仿真

在 Matlab/Simulink 中搭建由 5 块 PV 电池串联的 PV 阵列, 以验证 CS + INC 的 MPPT 控制策略的有效性。为模拟局部阴影情形, 仿真温度均设为 25 °C。在动态局部阴影下, 从上至下 PV 阵列辐照强度设置为: 0~0.8 s 为 1000 W/m<sup>2</sup>、1000 W/m<sup>2</sup>、400 W/m<sup>2</sup>、800 W/m<sup>2</sup>、800 W/m<sup>2</sup>, 最大输出功率为 5700 W; 0.8~2 s 为 1000 W/m<sup>2</sup>、1000 W/m<sup>2</sup>、500 W/m<sup>2</sup>、900 W/m<sup>2</sup>、900 W/m<sup>2</sup>, 最大输出功率为 6300 W。分别应用 INC<sup>[11]</sup>、GWO + P&O<sup>[13]</sup> 和 CS + INC 的 MPPT 控制方法, 仿真得到的 PV 阵列输出功率和输出电压曲线如图 14 所示。



(a) 输出功率



(b) 输出电压

图 14 局部阴影下光伏阵列输出特性曲线

Fig. 14 PV array output characteristic curve under partial shading

对比图 14 中的曲线可以发现, 所提 CS + INC 的 MPPT 控制策略比其他两种方法具有更快的最大功率点跟踪速度, 且最大功率点定位精度相对最佳, 同时也具有精确的电压跟踪能力。

### 5.2 储能系统控制仿真

为了证明图 10 所设计控制策略的可行性与有效性。根据图 1, 在 Matlab/Simulink 中搭建了包含 1 个 PV 系统、3 个 DESU 和 1 个可变等效负载的光储直流微电网。系统的仿真参数配置如表 2 所示, PV 系统采用 2.3 节设计的 CS + INC 的 MPPT 控制策略, 后续不再赘述。下面将在两种运行工况下重点对所提的新型双环控制策略进行验证。

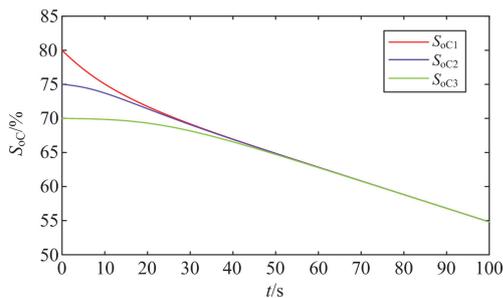
表 2 直流微电网仿真参数

Table 2 DC microgrid simulation parameters

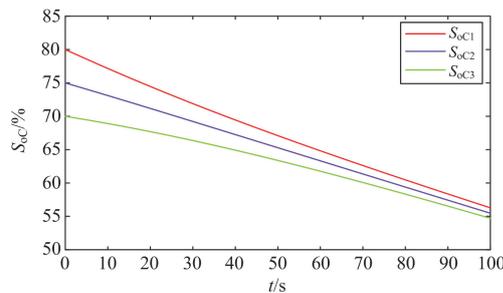
参数	数值
母线参考电压 $U_{ref}/V$	400
$C_{bat1}, C_{bat2}, C_{bat3}/Wh$	20, 20, 20
线路电阻 $R_{line1}, R_{line2}, R_{line3}/\Omega$	0.3, 0.2, 0.1
变换器滤波电容 $C/mF$	0.2
加速因子 $\alpha$	50
变换器滤波电感 $L/mH$	0.2

#### 工况 1: DESU 正常充放电

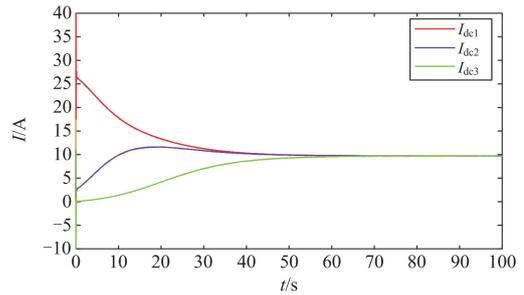
当光储直流微电网正常运行时, DESU 通过充放电来维持系统功率平衡。假设  $P_{PV} = 15.1 kW$ ,  $P_{load} = 26.7 kW$ , 3 个 DESU 的初始 SoC 分别为 80%、75%、70%。在图 10 所设计的控制策略下, DESU 的 SoC、对应变换器输出电流、直流母线电压变化曲线如图 15 所示。由图 15 中的曲线可以发现,



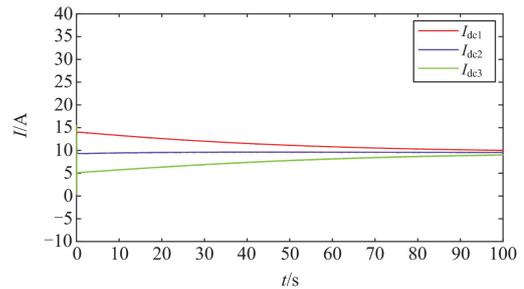
(a) 本文设计控制策略下的 SoC 曲线



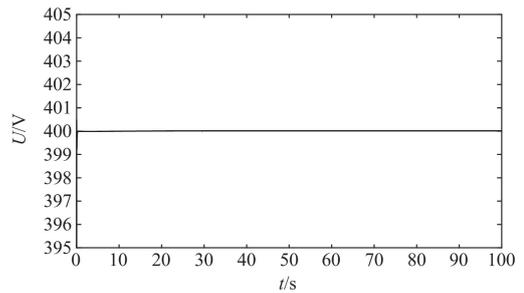
(b) 文献[25]所提控制策略下的 SoC 曲线



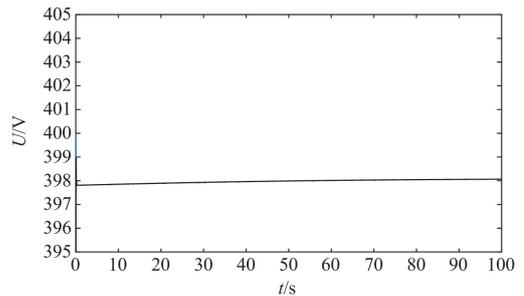
(c) 本文设计控制策略下的输出电流曲线



(d) 文献[25]所提控制策略下的输出电流曲线



(e) 本文设计控制策略下的母线电压曲线



(f) 文献[25]控制策略下的母线电压曲线

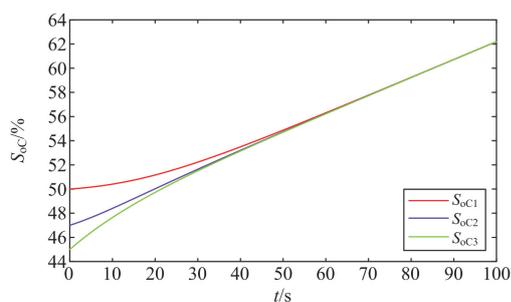
图 15 DESU 稳定放电时仿真结果

Fig. 15 Simulation results of DESU stable discharge

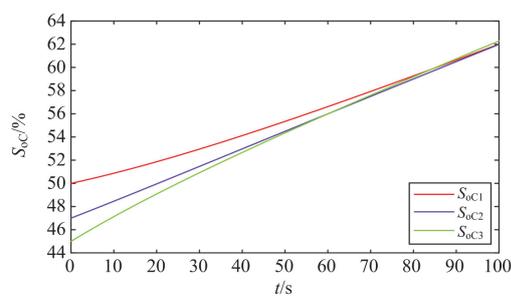
当  $P_{PV} < P_{load}$  时, DESU 处于放电状态, SoC 较大所对应的放电电流也大。通过图 15(a)、图 15(c)可知, 在所设计的控制策略作用下, 3 个 DESU 逐渐达到均衡, 对应变换器输出电流均衡趋势同 SoC 一致, 在 50 s 时实现电流均分, 稳定时误差几乎为 0; 通过图 15(e)可知, 在 DESU 放电过程中, 直流母线电

压始终维持在参考值 400 V 附近。而采用文献[25]中的控制策略时, 如图 15(b)、图15(d)、图15(f)所示, 趋于稳定时 SoC 误差为 1.7%, 电流误差为 1 A, 直流母线电压为 398 V, 低于参考电压 2 V。

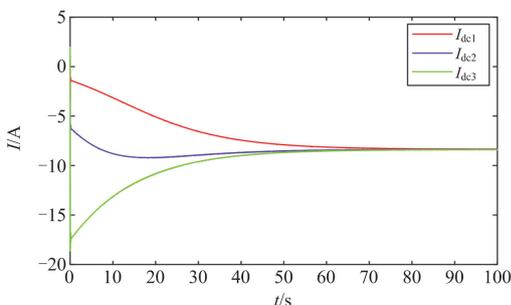
假设  $P_{PV} = 15.1 \text{ kW}$ ,  $P_{load} = 5 \text{ kW}$ , 3 个 DESU 的初始 SoC 分别为 50%、47%、45%。DESU 处于充电阶段下, DESU 的 SoC、对应变换器输出电流和直流母线电压曲线分别如图 16(a)、图 16(c)、图 16(e)所示。可以看出, 在所设计的控制策略下 SoC 较大的 DESU 所对应的充电电流较小; 大约在 50 s 时, DESU 的 SoC 和变换器输出电流均达到均衡状态, 误差几乎为 0, 且直流母线电压也始终稳定在参考值附近。而在文献[25]中的控制策略下, DESU 的 SoC、对应变换器输出电流和直流母线电压分别如图 16(b)、图 16(d)、图 16(f)所示, 可以发现趋于稳定时 SoC 误差为 0.3%, 电流误差为 0.91 A, 直流母线电压约为 401 V, 高于参考电压 1 V。



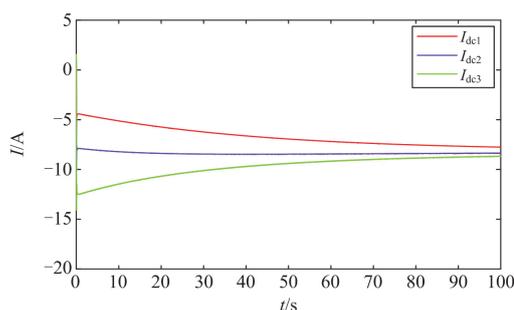
(a) 本文控制策略下的SoC曲线



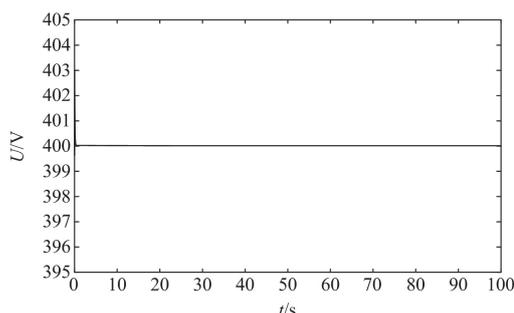
(b) 文献[25]所提控制策略下的SoC曲线



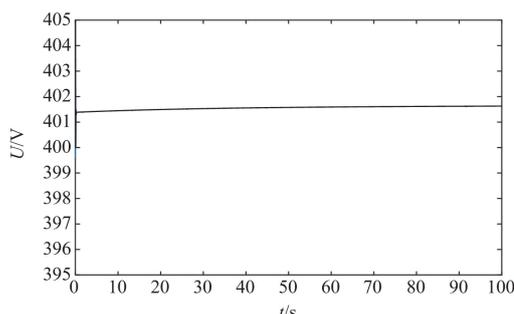
(c) 本文控制策略下的输出电流曲线



(d) 文献[25]所提控制策略下的输出电流曲线



(e) 本文控制策略下的母线电压曲线



(f) 文献[25]所提控制策略下的母线电压曲线

图 16 DESU 稳定充电时仿真结果

Fig. 16 Simulation results of DESU stable charging

### 工况 2: PV 输出功率和负载突变

光储直流微电网在实际运行过程中, 系统能量处于一个动态的平衡过程。PV 系统输出功率与负载都会出现动态变化。为模拟 PV 发电和负载的随机变化, 假设: 光照强度在 0~40 s 为  $800 \text{ W/m}^2$ 、40~70 s 为  $1500 \text{ W/m}^2$ 、70~100 s 为  $2500 \text{ W/m}^2$ ; 在光照强度变化下, 对应时段内 PV 系统输出功率为 12.9 kW、24 kW、39.1 kW; 0~40 s 负载为 23.8 kW、40~70 s 负载为 16 kW、70~100 s 负载为 43.1 kW; 3 个 DESU 的初始 SoC 分别为 70%、65%、60%。由 PV 系统输出功率与负载功率的差值可知, 在 0~40 s 和 70~100 s 时段, DESU 处于放电阶段; 在 40~70 s 时段, DESU 处于充电状态。采用图 10 所示的控制策略, DESU 的 SoC、对应变换器输出电流和直流母

线电压曲线如图 17 所示。无论系统功率如何变化均不影响 SoC 均衡与电流均分,且 DESU 在充放电模式切换瞬间反应迅速。此外,在 DESU 充放电模式切换瞬间,直流母线电压波动符合实际允许范围,即不超过额定电压的  $\pm 5\%$ 。

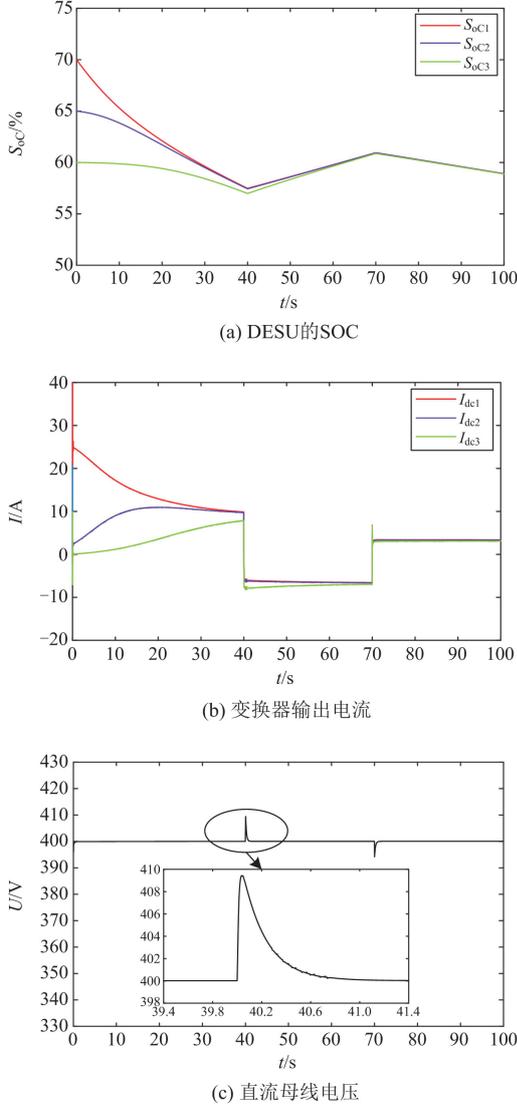


图 17 工况 2 下的实验结果

Fig. 17 Experimental results under operating condition 2

## 6 结论

本文以光储孤岛直流微电网为研究对象,设计了针对局部阴影情况下 CS+INC 的 MPPT 控制策略和一种新颖且简单的电压电流双环控制策略。CS+INC 的 MPPT 控制策略利用 CS 进行全局寻优,在最大功率点附近使用 INC 进行功率点跟踪;基于传统电压电流双环控制,将直流母线电压值作电压外环反馈值,解决了多 DESU 输出电流均分和母线

电压稳定问题;在电流内环的参考电流中加入了 SoC 均衡控制策略,并且引入均衡加速因子,可在 SoC 存在差异时快速自动调节,保障系统运行过程中 SoC 一致性。所设计的双环控制没有采用下垂控制,更无需二次补偿,也不用考虑线路电阻对电流均分的影响。通过 Simulink 仿真验证所提控制策略,CS+INC 的 MPPT 控制策略显示出了更精确、更快速的跟踪效果;无论在 DESU 充电还是放电过程中,新型的双环控制均使 SoC 快速均衡、变换器输出电流均分、直流母线电压保持稳定。

## 附录 A

式(24)中的系数如下:

$$\begin{aligned}
 b_8 &= k_{vp} L^2 C_{bat}^2 \\
 b_7 &= 2k_{vp} (RL + 2L^2 a_s + k_{cp} LU_{dc}) C_{bat}^2 + k_{vi} L^2 C_{bat}^2 \\
 b_6 &= k_{vp} (R^2 + 8RLa_s + 4L^2 a_s^2 + 2k_{ci} LU_{dc} + \\
 &\quad 2k_{cp} RU_{dc} + 8k_{cp} La_s U_{dc} + k_{cp}^2 U_{dc}^2) C_{bat}^2 + \\
 &\quad 2k_{vi} (RL + 2L^2 a_s + k_{cp} LU_{dc}) C_{bat}^2 \\
 b_5 &= 2k_{vp} [2(R^2 a_s + 2RLa_s^2) C_{bat}^2 + (k_{ci} R + 4k_{ci} La_s + \\
 &\quad 4k_{cp} Ra_s + 4k_{cp} La_s^2) U_{dc} C_{bat}^2 + (k_{cp} k_{ci} + 2k_{cp}^2 a_s) U_{dc}^2 C_{bat}^2 + \\
 &\quad k_{cp} LI_{ref} k\alpha a_s U_{dc} C_{bat}] + k_{vi} (R^2 + 8RLa_s + 4L^2 a_s^2 + \\
 &\quad 2k_{ci} LU_{dc} + 2k_{cp} RU_{dc} + 8k_{cp} La_s U_{dc} + k_{cp}^2 U_{dc}^2) C_{bat}^2 \\
 b_4 &= k_{vp} [4R^2 a_s^2 C_{bat}^2 + 8(k_{ci} Ra_s + k_{ci} La_s^2 + k_{cp} Ra_s^2) U_{dc} C_{bat}^2 + \\
 &\quad (4k_{cp}^2 a_s^2 + 8k_{cp} k_{ci} a_s + k_{ci}^2) U_{dc}^2 C_{bat}^2 + \\
 &\quad 2(k_{cp} R + 2k_{cp} La_s + k_{ci} L) I_{ref} k\alpha a_s U_{dc} C_{bat} + \\
 &\quad 2k_{cp}^2 I_{ref} kNa_s U_{dc}^2 C_{bat}^2] + 2k_{vi} [2(R^2 a_s + 2RLa_s^2) C_{bat}^2 + \\
 &\quad (k_{ci} R + 4k_{ci} La_s + 4k_{cp} Ra_s + 4k_{cp} La_s^2) U_{dc} C_{bat}^2 + \\
 &\quad (k_{cp} k_{ci} + 2k_{cp}^2 a_s) U_{dc}^2 C_{bat}^2 + k_{cp} LI_{ref} k\alpha a_s U_{dc} C_{bat}] \\
 b_3 &= 2k_{vp} [4k_{ci} Ra_s^2 U_{dc} C_{bat}^2 + 2(k_{ci}^2 a_s + 2k_{cp} k_{ci} a_s^2) U_{dc}^2 C_{bat}^2 + \\
 &\quad (k_{ci} R + 2k_{cp} Ra_s + 2k_{ci} La_s) I_{ref} k\alpha a_s U_{dc} C_{bat} + \\
 &\quad 2(k_{cp} k_{ci} + k_{cp}^2 a_s) I_{ref} k\alpha a_s U_{dc} C_{bat}^2] + k_{vi} [4R^2 a_s^2 C_{bat}^2 + \\
 &\quad 8(k_{ci} Ra_s + k_{ci} La_s^2 + k_{cp} Ra_s^2) U_{dc} C_{bat}^2 + (4k_{cp}^2 a_s^2 + \\
 &\quad 8k_{cp} k_{ci} a_s + k_{ci}^2) U_{dc}^2 C_{bat}^2 + 2(k_{cp} R + 2k_{cp} La_s + \\
 &\quad k_{ci} L) I_{ref} k\alpha a_s U_{dc} C_{bat} + 2k_{cp}^2 I_{ref} kNa_s U_{dc}^2 C_{bat}^2] \\
 b_2 &= 2k_{vp} [2k_{ci}^2 a_s^2 U_{dc}^2 C_{bat}^2 + 2k_{ci} RI_{ref} k\alpha a_s U_{dc} C_{bat} + \\
 &\quad (k_{ci}^2 + 4k_{cp} k_{ci} a_s) I_{ref} k\alpha a_s U_{dc} C_{bat}^2] + \\
 &\quad 2k_{vi} [4k_{ci} Ra_s^2 U_{dc} C_{bat}^2 + 2(k_{ci}^2 a_s + 2k_{cp} k_{ci} a_s^2) U_{dc}^2 C_{bat}^2 + \\
 &\quad (k_{ci} R + 2k_{cp} Ra_s + 2k_{ci} La_s) I_{ref} k\alpha a_s U_{dc} C_{bat} + \\
 &\quad 2(k_{cp} k_{ci} + k_{cp}^2 a_s) I_{ref} k\alpha a_s U_{dc} C_{bat}^2]
 \end{aligned}$$

$$b_1 = 4k_{vp}k_{ci}^2I_{ref}k\alpha a_s^2U_{dc}^2C_{bat} + 2k_{vi}[2k_{ci}^2a_s^2U_{dc}^2C_{bat}^2 + 2k_{ci}RI_{ref}k\alpha a_s^2U_{dc}C_{bat} + (k_{ci}^2 + 4k_{cp}k_{ci}a_s)I_{ref}k\alpha a_s^2U_{dc}^2C_{bat}]$$

$$b_0 = 4k_{vp}k_{ci}^2I_{ref}k\alpha a_s^2U_{dc}^2C_{bat}$$

## 参考文献

- [1] 王亚军, 王继东, 曹曼, 等. 光伏电站理论发电功率的优化计算模型与方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 144-153.  
WANG Yajun, WANG Jidong, CAO Man, et al. Optimization calculation models and methods for the theoretical power of a photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 144-153.
- [2] 高雪寒, 高源, 赵健, 等. 基于数据潮流模型的高比例光伏配电网三相不平衡优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 77-87.  
GAO Xuehan, GAO Yuan, ZHAO Jian, et al. Three-phase unbalanced optimization of a distribution network with a high proportion of distributed photovoltaic energy based on a data-driven power flow model[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 77-87.
- [3] 严小珊, 唐惠玲, 吴杰康, 等. 基于 MPC 的光-储协同调频优化策略[J]. 南方能源建设, 2024, 11(2): 125-138.  
YAN Xiaoshan, TANG Huiling, WU Jiekang, et al. Optimization strategy for collaborative frequency modulation of pvs-ess based on MPC[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(2): 125-138.
- [4] 赵虎府, 钱佳钰, 潘豪, 等. 孤岛光储直流微电网电压自适应下垂控制[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版): 1-11[2024-08-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20240424.0959.002.html>.  
ZHAO Hufu, QIAN Jiayu, PAN Hao, et al. Adaptive voltage droop control of DC microgrid for island photovoltaic and energy storage[J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition): 1-11[2024-08-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20240424.0959.002.html>.
- [5] 刘宿城, 褚勇智, 刁吉祥, 等. 基于输入-状态稳定条件的直流微电网集群分布式大信号稳定性[J/OL]. 电工技术学报: 1-15[2024-08-06]. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.232176.  
LIU Sucheng, CHU Yongzhi, DIAO Jixiang, et al. Distributed large signal stability based on input-to-state stability conditions for DC microgrid clusters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society: 1-15[2024-08-06]. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.232176.
- [6] 陈景文, 王媛, 王福强, 等. 光储直流微电网多运行工况稳定性分析[J]. 智慧电力, 2024, 52(4): 15-23.  
CHEN Jingwen, WANG Yuan, WANG Fuqiang, et al. Stability analysis of optical storage DC microgrid under multiple operating conditions[J]. Smart Power, 2024, 52(4): 15-23.
- [7] 高放, 胡嵘昭, 殷林飞, 等. 基于定位收缩法的局部阴影条件下光伏最大功率点跟踪[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 87-99.  
GAO Fang, HU Rongzhao, YIN Linfei, et al. Locate and shrink method for PV maximum power point tracking in partial shading conditions[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 87-99.
- [8] SAI B S V, KHADTARE S A, CHATTERJEE D. An improved weather adaptable P&O MPPT technique under varying irradiation condition[J]. ISA Transactions, 2023, 140: 438-458.
- [9] 谢佳伟, 应展烽, 李德明. 突散发热故障时的光伏 MPPT 变换器控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 170-178.  
XIE Jiawei, YING Zhanfeng, LI Deming. A control method for a photovoltaic MPPT converter with a sudden heat dissipation fault[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 170-178.
- [10] ELGENDY M A, ZAHAWI B, ATKINSON D J. Assessment of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques for PV pumping applications[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 21-33.
- [11] HSIEH G, MEMBER S, HSIEH H, et al. Photovoltaic power increment-aided with two-phased tracking[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6): 2895-2911.
- [12] 付文龙, 孟嘉鑫, 张赟宁, 等. 复杂遮荫下基于改进 GWO 的光伏多峰 MPPT 控制[J]. 太阳能学报, 2023, 44(3): 435-442.  
FU Wenlong, MENG Jiaxin, ZHANG Yunning, et al. Photovoltaic multi-peak MPPT control based on improved GWO under complex shade[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(3): 435-442.
- [13] 张铁晟, 张凤武, 张明毅. 基于 LGWO 和扰动观察复合算法的 MPPT 研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2022, 40(3): 379-386.  
ZHANG Tiesheng, ZHANG Fengwu, ZHANG Mingyi. MPPT research based on LGWO and perturbation[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition) 2022, 40(3): 379-386.
- [14] 黄崇鑫, 陈振宇, 邓松. 含储能双母线直流微电网电压和功率协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 141-149.  
HUANG Chongxin, CHEN Zhenyu, DENG Song. Voltage-power coordinated control of a dual-bus DC microgrid with energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 141-149.
- [15] 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 isolated DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 139-146.
- [16] LIU S, MIAO H, LI J, et al. Voltage control and power sharing in DC microgrids based on voltage-shifting and droop slope-adjusting strategy[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 214.
- [17] 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.
- [18] MI Y, GUO J, FU Y, et al. Accurate power allocation of multienergy storage island DC microgrid based on virtual power rating[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 38(1): 261-270.
- [19] 么钟然, 孙丽颖. 考虑线路阻抗的分布式储能 SOC 均衡控制策略研究[J]. 中国电力, 2024, 57(9): 238-246.
- ME Zhongran, SUN Liying. Research on balanced control strategy of distributed energy storage SOC considering line impedance[J]. Electric Power, 2024, 57(9): 238-246.
- [20] HOANG K D, LEE H H. Accurate power sharing with balanced battery state of charge in distributed DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(3): 1883-1893.
- [21] 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.
- [22] 张汀, 雷勇, 王小昔. 考虑 SOC 均衡的直流微网储能系统控制策略研究[J]. 电源技术, 2023, 47(8): 1099-1104.
- ZHANG Ting, LEI Yong, WANG Xiaoxi. Research on control strategy of DC microgrid energy storage system considering SOC equilibrium[J]. Power Supply Technology, 2023, 47(8): 1099-1104.
- [23] PAN H, FENG X, LI F, et al. Energy coordinated control of DC microgrid integrated incorporating PV, energy storage and EV charging[J]. Applied Energy, 2023, 342.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] IQBAL R, LIU Y, ZENG Y, et al. Adaptive droop-based SoC balancing control scheme for parallel battery storage system in shipboard DC microgrid[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 79.
- [27] NI J, ZHAO B, GOUDARZI A, et al. A dispatchable droop control method for PV systems in DC microgrids[J]. IEEE Access, 2023, 11: 7588-7598.
- [28] 代广贵, 何晋, 吴富磊, 等. 一种无电压观测器的多储能协调运行控制策略[J/OL]. 电源学报: 1-16[2024-08-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20231023.1603.010.html>.
- DAI Guanggui, HE Jin, WU Fulei, et al. A control strategy for coordinated operation of multiple energy storage without voltage observer[J/OL]. Journal of Power Supply: 1-16[2024-08-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20231023.1603.010.html>.
- [29] MI Y, DENG J, YANG X, et al. The novel multiagent distributed SOC balancing strategy for energy storage system in DC microgrid without droop control[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 146.
- [30] 郑岩, 陈永刚, 张国帅, 等. 峰值电流模式的蓄电池放电调节器稳定性分析[J]. 电源技术, 2018, 42(6): 898-902.
- ZHENG Yan, CHEN Yonggang, ZHANG Guoshuai, et al. Stability analysis of battery discharge regulator in peak current mode[J]. Power Supply Technology, 2018, 42(6): 898-902.

收稿日期: 2024-06-06; 修回日期: 2024-08-09

作者简介:

潘欢(1983—), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能电网分析、微电网控制、新能源并网与控制; E-mail: pan198303@gmail.com

宁显华(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为直流微电网控制; E-mail: 1667864524@qq.com

李峰(1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电技术、电力电子与电子传动。E-mail: peakily@126.com

(编辑 魏小丽)