

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211012

# 一种直流微电网多光伏变换器新型功率分配策略

张勤进, 胡王宝, 刘彦呈, 曾宇基, 吕旭

(大连海事大学轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 为了解决光伏单元在运行过程中因工作模式切换造成的母线电压波动问题, 提出一种新型平滑切换控制策略。根据光伏电池的输出生特性曲线, 将输出功率对输出电流的微分作为控制变量。通过跟踪不同的  $dp/di$  指令值来实现光伏单元最大功率点跟踪模式、恒压下垂模式的控制以及两种模式间的平滑切换。在此基础上, 针对多光伏变换器工作在恒压下垂控制时因线路阻抗差异造成功率分配精度较低的问题, 提出一种基于二次调节的自适应下垂控制策略。此外, 构建相邻光伏单元间的稀疏通信网络, 并采用动态一致性算法实现相关平均信息的全局稳定收敛。仿真和实验结果表明, 所提控制策略可以实现光伏单元工作模式切换过程平滑过渡和负荷功率的精确分配。

**关键词:** 直流微电网; 多光伏变换器; 平滑切换; 自适应下垂控制; 功率分配; 动态一致性算法

## A novel power sharing strategy for multi photovoltaic converters in a DC microgrid

ZHANG Qinjin, HU Wangbao, LIU Yancheng, ZENG Yuji, LÜ Xu

(College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** To solve the problem of bus voltage fluctuation caused by the switching of working modes during the operation of a photovoltaic unit, a novel smooth switching control strategy is proposed. From the output characteristic curve of the photovoltaic cell, the differential of the output power to the output current is used as the control variable. By tracking different  $dp/di$  command values, the PV converter can realize the control of MPPT mode, CVD mode and smooth switching between the two modes. To solve the problem of low power distribution accuracy caused by the difference of line impedance when multiple photovoltaic converters work in the CVD mode, an adaptive droop control strategy based on secondary regulation is proposed. In addition, a sparse communication network between adjacent photovoltaic units is constructed, and a dynamic consensus algorithm is used to achieve global stable convergence of related average information. The simulation and experimental results show that the proposed control strategy can realize the smooth transition of the PV unit working mode switching process and the precise sharing of load power.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51709028 and No. 51979021).

**Key words:** DC microgrid; multi PV converters; smooth switching; adaptive droop control; power sharing; dynamic consensus algorithm

## 0 引言

为应对能源危机, 以光伏等可再生能源为主的分布式发电技术得到了广泛应用。直流微电网能最

大化接纳分布式电源, 其中具有代表性的光储直流微电网具有节能环保、能量利用率高、可靠性高和灵活性强等优点, 是未来分布式能源系统的发展趋势<sup>[1-5]</sup>。

独立光储直流微电网由光伏发电单元、储能单元和各类负载组成。随着光伏渗透率的提高, 多组光伏电池(Photovoltaic Cell, PV)分别与 DC/DC 变换器构成多光伏发电单元, 为直流微电网提供清洁的可再生能源。微电网运行期间, 光伏单元需要根据微电网直流母线电压信号, 在恒压下垂(Constant Voltage

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51709028, 51979021); 辽宁省重点研发计划项目资助(2019JH8/10100045); 中央高校基本科研业务费专项基金项目资助(3132019317); 大连市“青年科技之星”高层次人才创新支持计划项目资助(2019RQ008)

Droop, CVD) 模式与最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 模式间进行切换<sup>[6-8]</sup>。MPPT 模式下的光伏单元作为电流源, 通过调节光伏变换器的输入电压为控制目标来保持最大功率输出; 而 CVD 模式下的光伏单元作为电压源, 通过调节光伏变换器的输出电压为控制目标来稳定直流母线电压。传统的光伏单元采用两套相对独立的控制环路分别对两种模式进行控制, 在工作模式切换的过程中, 存在系统输出功率波动和直流母线电压振荡问题, 影响微电网的稳定运行。为此, 部分学者提出光伏单元工作模式平滑切换控制策略, 以平抑系统输出功率波动及维持母线电压平稳。文献[9]提出一种基于逐步逼近的 off-MPPT 控制策略, 通过相应的算法, 以光伏电池输出电压作为双闭环中电压外环的控制信号来调节光伏的输出功率, 但该策略存在切换过程耗时长而造成母线电压波动较大的问题。文献[10]首先设计二重积分滑模控制器对光伏系统的 DC/DC 变换器进行控制, 在此基础上, 提出一种利用直流母线电压信息对光伏电池参考工作点进行偏移的无缝切换策略, 其偏移信号由恒压控制器给出, 可以实现两种模式间的无缝切换。文献[11]通过光伏系统输出端电压的闭环控制, 设计了一种可以实现光伏系统不同工作模式的统一控制策略。然而, 上述文献所提方法只针对单个光伏电池, 未涉及多个光伏电池并联工作的情况。考虑多个光伏电池并联工作的情况, 文献[12]提出一种利用母线电压反馈系数实现多光伏发电单元依次降功率运行的控制策略, 通过合理设置直流母线电压与光伏电压各自比较值的限幅, 再选取两者较小值作为光伏单元控制量, 实现不同工作模式间的合理切换。但该策略控制复杂, 需要的控制设备较多。文献[13]提出了一种基于下垂曲线平移的直流微电网光伏单元的无缝切换控制策略, 所提出的控制策略也是利用直流母线电压信息对光伏电池参考工作点进行偏移, 与文献[10]不同的是其采用 MPPT 模块的输出作为电压偏移, 并将其发送到下垂控制环路。该方法可以实现光伏单元工作模式间的无缝切换, 并利用传统下垂控制解决了并联光伏电池功率分配问题。上述文献所提出的控制策略中, 光伏电池的控制结构都由最大功率点跟踪控制和恒压控制两个独立的控制环路组成。虽然可能共用同一个电压或电流控制内环, 但当光伏电池需要切换运行模式的时候, 仍然需要从一个控制环路切换到另一个控制环路, 控制环路的硬切换还是会引起母线电压振荡。

此外, 当光伏单元工作在 CVD 模式时, 由于电路参数和线路阻抗的差异, 传统的下垂控制无法

解决功率精确分配的问题, 导致各光伏变换器的输出功率无法按自身容量成比例精确分配。长期的输出功率分配比例不均易引发光伏变换器过流、过压, 甚至在极端情况下触发保护等一系列不良后果。为此, 国内外学者提出改进的下垂控制策略来提高光伏变换器功率分配精度。文献[14-16]在传统下垂控制的基础上采用自适应下垂控制, 根据变换器输出状态动态改变下垂系数来优化各单元间的电流分配。文献[17-18]提出一种新型的下垂控制方法, 以电压变化率或电压的二次方来代替传统下垂控制  $I-U$  关系中的电压, 从而减小电压电流影响, 改善负荷电流分配精度。文献[19]提出了一种基于低带宽通信的改进下垂控制方法, 通过低带宽通信共享各变换器的信息, 按变换器容量比例计算出电流平均值, 再将平均值与本地电流作差, 送至 PI 控制器, 补偿基准电压, 改善电流分配精度。已有的改进下垂控制方法通常在传统下垂控制的基础上利用低带宽通信获取系统全局信息, 以实现相关控制效果的优化。然而随着系统进一步扩容, 变换器之间的通信负担急剧加重, 最终难以实现并联变换器的协调运行<sup>[20]</sup>。针对此问题, 文献[21-22]提出基于多智能体一致性算法的改进下垂控制, 通过构造相邻变换器的点对点通信协议来简化通信网络, 以减轻系统通信负担及提高微电网的可扩展性。然而, 目前大多数改进下垂控制策略主要应用在储能单元, 应用在光伏单元的相关研究较少<sup>[23-24]</sup>。

针对以上问题, 本文以光储直流微电网的光伏单元为研究对象, 提出一种新型模式平滑切换控制策略。首先根据光伏电池的输出特性曲线, 将输出功率对输出电流的微分作为控制变量, 通过跟踪不同的  $dp/di$  指令值来实现光伏单元最大功率点跟踪模式、恒压下垂模式的控制以及两种模式间的平滑切换。在此基础上, 提出一种基于二次调节的自适应下垂控制策略, 设计了包含光伏单元输出功率和变换器输出电流信息的  $\gamma$  因子, 通过动态改变下垂系数, 消除线路阻抗不一致对功率分配精度的影响, 实现负荷功率精确分配。在通信层, 每台变换器通过稀疏的通信网络与相邻变换器交换  $\gamma$  因子和输出电流, 使用动态一致性算法获取全局的平均  $\gamma$  因子和变换器平均电流, 减轻通信压力。文中对所提方法进行了详细的说明, 并利用仿真和实验证明了方法的有效性。

## 1 光伏单元传统控制策略

### 1.1 光储直流微电网结构与能量管理策略

图 1 为独立光储直流微电网的简化结构图, 其

组成包括多组光伏电池及其变换器组成的光伏单元、蓄电池及其自身变换器组成的储能单元和各类负载。 $P_{pv}$  表示光伏单元输出功率,  $P_{es}$  表示储能单元的充/放电功率,  $P_{load}$  表示负载消耗的功率。微电网运行时, 有

$$P_{load} = P_{pv} + P_{es} \quad (1)$$

从式(1)可以看出, 微电网内各单元产生的功率波动都会造成系统内部的功率变化并引起直流母线电压波动。因此, 需根据微电网内各系统的运行特点对直流母线电压进行协调控制。

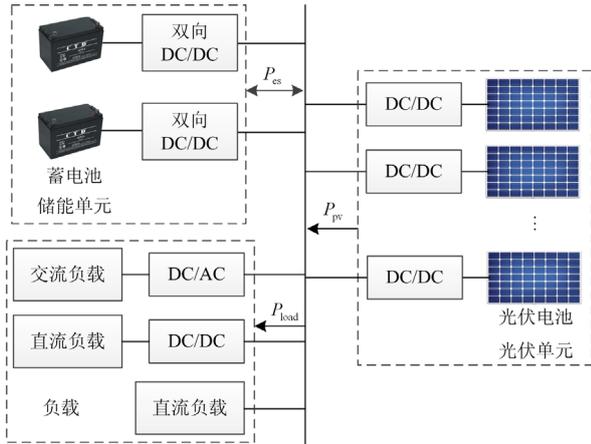


图1 独立光储直流微电网简化结构

Fig. 1 Island DC microgrid simplified architecture with photovoltaic-storage system

表1为独立光储直流微电网的能量管理策略。当微电网运行时, 为了充分利用太阳能资源, 光伏单元工作在MPPT模式以尽可能多地输出功率, 储能单元根据微网内负载需求工作在充电或者放电模式。若出现光伏单元的输出功率大于微网负荷需求, 且储能单元无法吸纳多余功率的情况下, 直流微电网内功率过剩, 母线电压将会骤升。当母线电压上升至1.03倍的 $U_{dc}$ 时, 光伏单元需要从MPPT模式切换至CVD模式, 实现降功率运行, 使它与微网内负载所消耗的功率相等, 以维持直流母线电压的稳定。当微电网内光伏单元供电不足时, 母线电压将会下降, 此时光伏单元应工作在MPPT模式以最大功率输出, 由储能单元稳定母线电压。

表1 独立光储直流微电网能量管理策略

Table 1 Energy management strategy of island PV-storage DC microgrid

光伏单元	储能单元	母线电压
MPPT	放电	$0.97U_{dc}$
MPPT	放电/充电	$U_{dc}$
CVD	充电/待机	$1.03U_{dc}$

## 1.2 传统模式切换控制策略

如1.1节所述, 微电网运行期间, 光伏单元需要根据直流母线电压信息, 在MPPT与CVD模式间进行切换。图2为文献[8,13,25]所提到的光伏单元传统模式切换控制策略框图, 其中:  $u_{pvi}$  和  $u_{pvi\_ref}$  分别表示第*i*台光伏电池输出电压及其参考值;  $i_{pvi}$  为光伏电池输出电流;  $u_{dci}$  为第*i*台变换器输出电压;  $u_{dc\_ref}$  是直流母线电压参考值;  $d_i$  为变换器占空比信号。从图中可以看出, MPPT控制环和CVD控制环是相互独立的控制环路, 在工作模式切换的瞬间, 由一个控制环切换至另一个控制环很明显会给系统带来一定的扰动, 使PWM的输出发生跳变, 导致切换过程前后光伏单元输出功率的突变, 引起直流母线电压大幅波动。

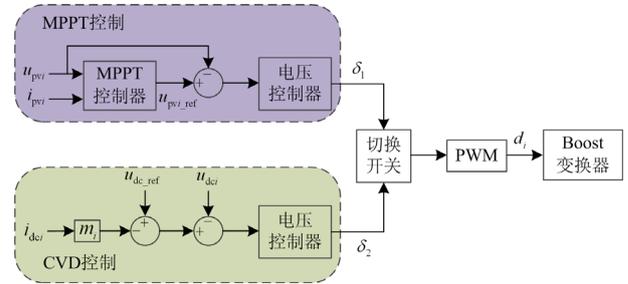


图2 光伏单元传统模式切换控制策略框图

Fig. 2 Block diagram of traditional mode switching control strategy for PV unit

## 1.3 传统下垂控制策略

图3为两台变换器并联的直流微电网简化电路模型, 其中:  $u_{ok}$  和  $i_{ok}$  分别表示变换器输出电压和输出电流,  $u_{ref}$  表示变换器参考电压,  $u_{pcc}$  表示直流母线电压;  $R$  表示负载电阻,  $r_k$  表示变换器到母线的线路电阻,  $R_{vk}$  表示变换器与线路电阻之间串联的虚拟电阻, 也称为下垂系数。传统下垂控制的表达式为

$$u_{ok} = u_{ref} - R_{vk} \cdot i_{ok} \quad (2)$$

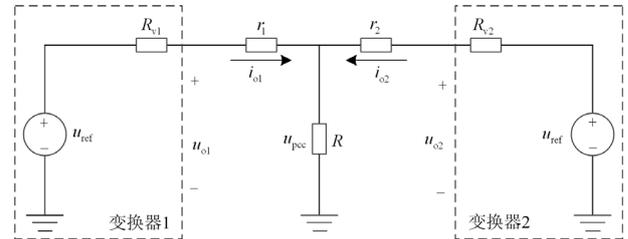


图3 两台变换器并联的直流微电网简化结构

Fig. 3 DC microgrid simplified structure with 2 paralleled converters

根据图3, 由基尔霍夫电压定律可以求得

$$u_{pcc} = u_{ok} - r_k \cdot i_{ok} \quad (3)$$

联立式(2)、式(3),可以求得两台变换器的电流分配比为

$$\frac{i_{o1}}{i_{o2}} = \frac{R_{v2} + r_2}{R_{v1} + r_1} \quad (4)$$

在传统下垂控制中,假设变换器的虚拟阻抗远大于线路阻抗,此时根据式(4),只需变流器虚拟阻抗  $R_{vk}$  按变换器额定容量成反比关系进行功率分配。然而在实际系统中,线路阻抗并不能忽略,由式(4)可知,只有线路阻抗的比值与虚拟阻抗的比值相等时,才不会影响功率分配精度。但是线路阻抗往往具有不确定性,所以当光伏单元工作在 CVD 模式时,由于线路阻抗的存在,传统下垂控制将无法足功率精确分配的需求。

## 2 改进的光伏单元控制策略

### 2.1 光伏电池 $dp/di$ 控制原理

本文首先针对光伏单元运行过程中工作模式切换造成的母线电压不稳定问题,提出一种基于  $dp/di$  控制的平滑切换策略,这里  $dp/di$  是指光伏电池输出功率对其输出电流的微分。

光伏电池输出电流为<sup>[26]</sup>

$$i_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_o \left[ \exp\left(\frac{q u_{pv} + q_i R_s}{N_s a k T}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

式中:  $I_{ph}$  为光生电流;  $I_o$  为光伏电池的饱和电流;  $q$  为电子电量常数;  $R_s$  为光伏电池的串联电阻;  $a$  为二极管理想系数;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为光伏电池温度;  $N_p$  和  $N_s$  分别为并联和串联的光伏阵列数量。

由式(5)可以得到光伏电池输出电压为

$$u_{pv} = \frac{N_s a k T}{q} \ln\left(\frac{N_p I_{ph} - i_{pv}}{N_p I_o} + 1\right) - R_s i_{pv} \quad (6)$$

则光伏电池输出功率为

$$p_{pv} = u_{pv} i_{pv} = \frac{N_s a k T i_{pv}}{q} \ln\left(\frac{N_p I_{ph} - i_{pv}}{N_p I_o} + 1\right) - R_s i_{pv}^2 \quad (7)$$

根据式(7)可以得到光伏电池输出功率与输出电流之间的非线性关系,如图4所示。

整个曲线可以根据切线的斜率即  $dp/di$  的正负符号分成两个区域,分别为“电压源区”和“电流源区”<sup>[27]</sup>。光伏电池  $P_{pv}-I_{pv}$  曲线上有2个点均可保证输出功率与负载消耗功率平衡。光伏电池在“电压源区”运行时,呈现出光伏输出电流与输出功率同向变化的理想特性。当负载减小时,光伏输出功率应减小,输出电流也随之减小。反之,如果光伏电池在“电流源区”运行时,负载降低会导致光伏输出电流增加。如果输出电流过高,超过光伏电池

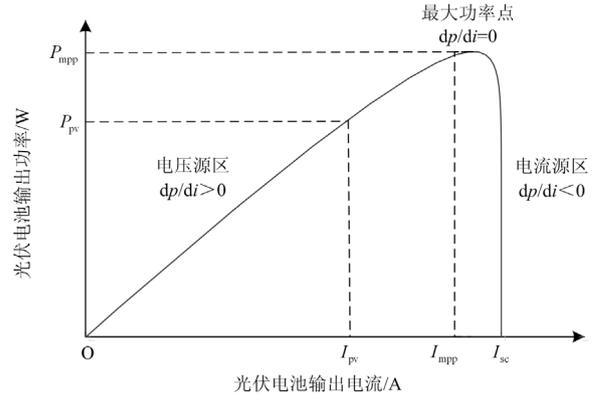


图4 光伏电池  $P_{pv}-I_{pv}$  特性曲线

Fig. 4  $P_{pv}-I_{pv}$  characteristic curve of PV cell

所能提供的最大电流,光伏电池将无法正常工作。因此,控制光伏电池工作在电压源区,有利于系统的稳定性。从图中还可得知,  $dp/di$  值反映了光伏电池的输出功率,因此也就标定了光伏电池的运行点。当光伏电池工作于最大功率点时,  $dp/di$  的值为0,这个0值不会随着光照强度及温度条件的改变而变化。而当光伏电池工作在“电压源区”时,  $dp/di$  的值为正;当光伏电池工作在“电流源区”时,  $dp/di$  值为负。因此,通过正的  $dp/di$  参考值就可以将光伏电池限制在“电压源区”,可以通过合适的  $dp/di$  指令来精确地控制光伏电池的输出功率,进而使光伏单元工作在不同模式,光伏单元就具备了稳定直流母线电压的能力。

$dp/di$  表示光伏电池  $P_{pv}-I_{pv}$  特性曲线切线的斜率,其值决定了光伏电池的输出功率。因此,本文将  $dp/di$  作为控制变量,并通过光伏电池的电导增量来计算其  $dp/di$  值,如式(8)所示。

$$\frac{dp}{di} = \frac{d(ui)}{di} = \frac{udi + idu}{di} = u + i \frac{du}{di} = u + i / \frac{di}{du} \quad (8)$$

### 2.2 基于 $dp/di$ 控制的平滑切换控制策略

图5为所提的光伏单元控制策略框图,该策略由  $dp/di$  调节器、母线电压调节器、下垂控制器和二次调节器组成。在下垂控制器中,根据表1所示的独立光储直流微电网能量管理策略,设置  $u_{dc\_ref}$  等于  $1.05U_{dc}$ ,设置  $u_i^*$  等于  $1.03U_{dc}$ 。在母线电压调节器中,下垂控制器给出的直流母线电压给定值  $u_i^*$  与变换器输出电压  $u_{dci}$  比较,当变换器输出电压  $u_{dci}$  小于给定值  $u_i^*$  时,由于负向限幅器的作用,控制器输出的  $dp/di$  参考值为0,此时  $dp/di$  计算器跟踪0指令值,使光伏单元工作在MPPT模式;当变换器输出电压  $u_{dci}$  大于给定值  $u_i^*$  时,母线电压调节器有输出,产生正的  $dp/di$  参考值,此时  $dp/di$  计算器跟

踪正的指令值, 使光伏电池退出最大功率点, 并向“电压源区”过渡, 同时降低光伏电池的输出功率, 从而完成从 MPPT 模式向 CVD 模式的切换。

通过这种方式, 可以实现 CVD 模式下系统内功率的实时平衡, 并稳定直流母线电压。根据上述控制原理, 该控制策略不存在控制环路的切换, 使用一种控制环路统一了 MPPT 和 CVD 模式。光伏单元的工作模式切换可通过跟踪光伏电池不同的  $dp/di$  值来完成, 从而实现光伏单元工作模式的平滑过渡。

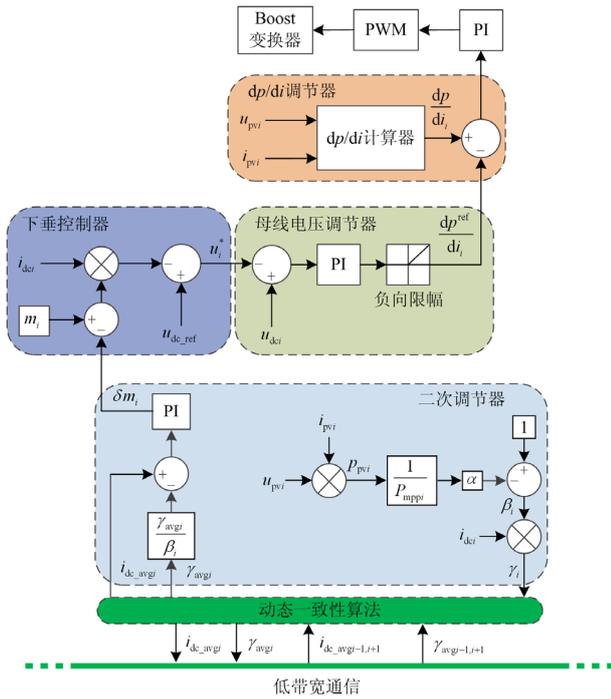


图 5 所提出的光伏单元控制策略框图

Fig. 5 Block diagram of proposed control strategy for PV unit

### 2.3 基于二次调节的自适应下垂控制策略

本文在设计光伏单元工作模式平滑切换控制策略的基础上, 针对多光伏变换器工作在恒压下垂控制时因线路阻抗差异造成功率分配精度较低的问题, 提出一种基于二次调节的自适应下垂控制策略。所提的控制策略框图如图 5 所示, 在二次调节器中, 每台变换器首先根据式(9)计算出含有光伏电池输出功率和变换器输出电流信息的  $\gamma$  因子。

$$\gamma_i = \beta_i \cdot i_{dc_i} \quad (9)$$

式中,  $\beta_i$  表示功率因子, 表达式如式(10)。

$$\beta_i = 1 - \alpha \cdot \frac{p_{pvi}}{P_{mppi}} \quad (10)$$

式中, 系数  $\alpha$  是为了防止当  $p_{pvi} = P_{mppi}$  时, 功率因子  $\beta_i = 0$ , 该系数在系统中主要影响消除线路阻抗差

异时的收敛速度, 在本文中取为 0.5。

每台变换器通过稀疏通信网络与相邻的变换器共享  $\gamma$  因子和变换器输出电流, 使用动态一致性算法计算出平均  $\gamma$  因子和平均输出电流, 再将  $\gamma_{avg}$  除以功率因子  $\beta_i$ , 并与变换器平均电流作差, 送至 PI 控制器, 得到下垂系数的调节量  $\delta m_i$ 。

$$\delta m_i = k_p \left( i_{dc\_avg} - \frac{\gamma_{avg}}{\beta_i} \right) + k_i \int \left( i_{dc\_avg} - \frac{\gamma_{avg}}{\beta_i} \right) dt \quad (11)$$

式中,  $k_p$  和  $k_i$  分别表示 PI 控制器的比例系数和积分系数。

下面分析所提控制策略的可行性, 假设式(11)可以收敛, 可以得到

$$i_{dc\_avg} = \frac{\gamma_{avg}}{\beta_i} \quad (12)$$

式中,  $i_{dc\_avg}$  和  $\gamma_{avg}$  表示相应的平均值, 分别表示为

$$i_{dc\_avg} = \frac{\sum_{i=1}^n i_{dc_i}}{n} \quad (13)$$

$$\gamma_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i}{n} \quad (14)$$

根据式(9)一式(14), 可以进一步得到

$$\frac{P_{pv1}}{P_{mppi1}} = \frac{P_{pv2}}{P_{mppi2}} = \dots = \frac{P_{pvn}}{P_{mppn}} \quad (15)$$

当满足式(15)时, 就可以消除线路阻抗差异对功率分配精度的影响。基于二次调节的自适应下垂控制策略表达式为

$$u_i^* = u_{dc\_ref} - (m_i + \delta m_i) \cdot i_{dc_i} \quad (16)$$

该策略在传统下垂控制表达式的基础上, 动态调节下垂系数, 进而对变换器的输出电流产生调节作用, 产生的调节效果如图 6 所示。

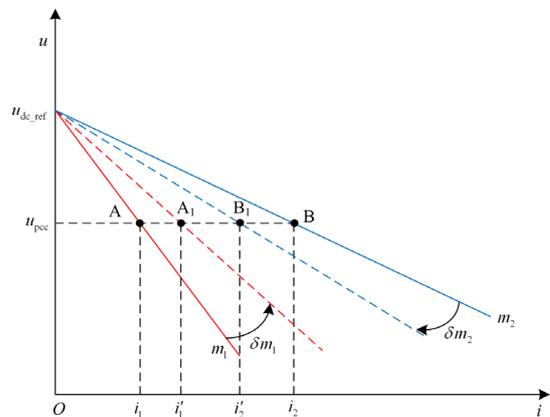


图 6 下垂曲线调节效果

Fig. 6 Adjustment effect of droop curve

其中, 实线为两个光伏单元的传统下垂控制曲线, 下垂系数分别为  $m_1$  和  $m_2$ ; 虚线为经过所提控制策略调节后的下垂曲线, 调节量分别为  $\delta m_1$  和  $\delta m_2$ 。从图 6 中可以看出, 两条不同下垂系数的传统下垂曲线初始分别运行在 A 和 B 点, 此时对应的电流分配比为  $i_2/i_1$ 。经过所提控制策略调节之后, 分别运行在  $A_1$  和  $B_1$  点, 对应的电流分配比为  $i_2'/i_1'$ 。由此可见, 通过动态改变下垂系数, 可以对光伏单元的输出功率进行调整。

### 2.4 动态一致性算法

如 2.3 节所述, 本文提出一种基于二次调节的自适应下垂控制策略, 设计了包含光伏单元输出功率和变换器输出电流信息的  $\gamma$  因子, 并通过通信网络共享变换器的  $\gamma$  因子和输出电流。为了减轻通信压力, 每个光伏单元都可以看作智能体, 构建相邻的稀疏通信网络。本文使用动态一致性算法来获取平均  $\gamma$  因子和变换器平均电流, 每个光伏单元只需要通过交换相邻单元的信息来获取稳定收敛的平均值, 采用的动态一致性算法如式(17)和式(18)所示<sup>[28]</sup>。

$$X_{avg_i}(k+1) = X_i(0) + \varepsilon \cdot \sum_{j \in N_i} \delta_{ij}(k+1) \quad (17)$$

$$\delta_{ij}(k+1) = \delta_{ij}(k) + a_{ij} \cdot [X_{avg_j}(k) - X_{avg_i}(k)] \quad (18)$$

式中:  $X_i(0) = [\gamma_i, i_{dc_i}]$  是每个光伏单元的  $\gamma$  因子和变换器输出电流;  $N_i$  是连接第  $i$  个光伏单元的节点数;  $\varepsilon$  表示通信权重;  $X_{avg_i}(k)$  和  $X_{avg_i}(k+1)$  分别表示在第  $k$  次和第  $k+1$  次迭代的平均估计值;  $\delta_{ij}(k)$  和  $\delta_{ij}(k+1)$  分别表示在第  $k$  次和第  $k+1$  次迭代期间两个光伏单元  $i$  和  $j$  之间的累计误差, 且  $\delta_{ij}(0) = 0$ ;  $a_{ij}$  表示节点  $i$  和  $j$  之间的连接状态,  $a_{ij} = 1$  表示节点  $i$  和  $j$  有通信连接,  $a_{ij} = 0$  表示节点  $i$  和  $j$  没有通信连接。

为了确保动态一致性算法快速收敛及其稳定性, 需要选取合适的通信权重  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon$  的定义如式(19)所示<sup>[29]</sup>。

$$\varepsilon = \frac{2}{\lambda_1(\mathbf{L}) + \lambda_{n-1}(\mathbf{L})} \quad (19)$$

式中:  $\mathbf{L}$  是通信拓扑的拉普拉斯矩阵;  $\lambda_1(\mathbf{L})$  和  $\lambda_{n-1}(\mathbf{L})$  分别表示矩阵  $\mathbf{L}$  的最大特征值和次小特征值。

拉普拉斯矩阵  $\mathbf{L}$  如式(20)所示。

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} d_1 & l_{12} & \cdots & l_{1N} \\ l_{21} & d_2 & \cdots & l_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{N1} & l_{N2} & \cdots & d_N \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: 如果  $i$  和  $j$  是相邻的节点, 则  $l_{ij} = -1$ , 如果  $i$  和  $j$  是不相邻的节点, 则  $l_{ij} = 0$ ;  $d_i$  是节点  $i$  的度, 表示与节点  $i$  通信的节点数。所以不同的通信拓拓扑对应的拉普拉斯矩阵  $\mathbf{L}$  不同, 通信权重  $\varepsilon$  也会不同, 会对一致性算法的收敛性能有一定的影响。

为了说明不同通信拓拓扑对动态一致性算法收敛性能的影响, 搭建了 4 个光伏单元并联运行的仿真模型, 以平均  $\gamma$  因子收敛为例来说明该算法的收敛性能, 仿真结果如图 7 所示,  $\gamma$  因子的单位为 A, 假设  $\gamma$  因子的初始值分别为 2、3、4、5。从图 7 中

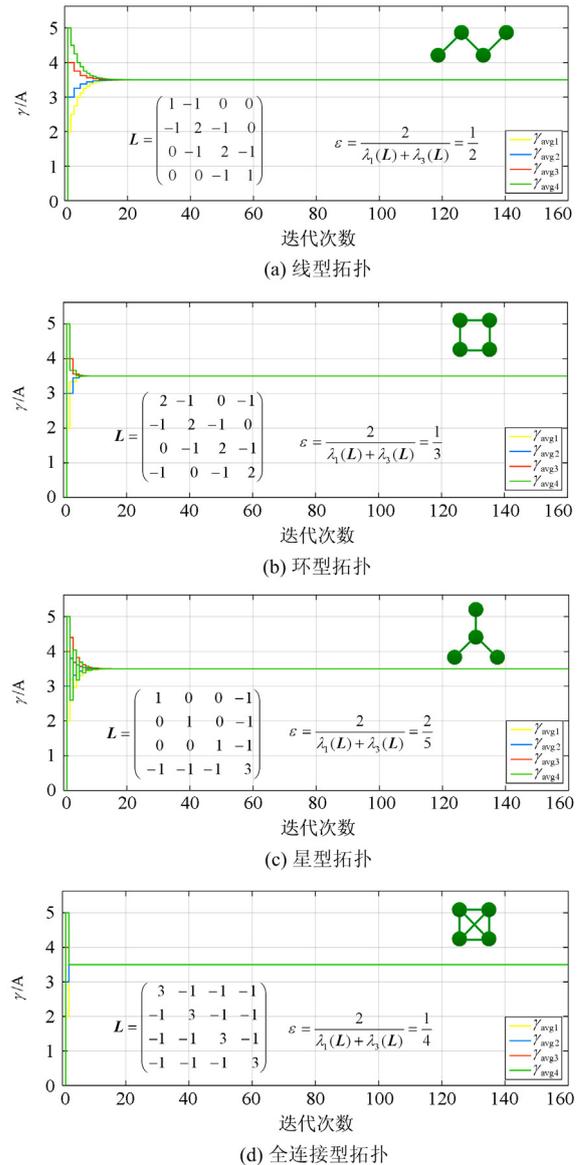


图 7 不同通信拓拓扑对一致性算法收敛性能的影响  
Fig. 7 Influence of different communication topologies on convergence performance of consensus algorithm

可以看出, 线型拓扑在收敛过程中振荡较少, 收敛速度最慢; 星型拓扑在收敛过程中振荡最多, 收敛速度较慢; 全连接型拓扑在收敛过程中振荡最少, 收敛速度最快, 但是通信网络比较复杂, 通信压力较大; 环型拓扑在收敛过程中振荡较少, 收敛速度较快, 并且通信网络简单, 通信压力较小。因此, 本文选取环型拓扑作为光伏单元之间的通信拓扑。

为了验证动态一致性算法的可靠性, 考虑通信故障对动态一致性算法收敛性能的影响。同样以平均  $\gamma$  因子收敛为例来说明动态一致性算法的收敛性能, 搭建了 4 个光伏单元并联运行的仿真模型, 选择环形通信拓扑, 在第 80 次迭代中两个单元中断通信。仿真结果如图 8 所示, 假设  $\gamma$  因子的初始值分别为 2、3、4、5。从图 8 中可以看出, 在通信拓扑发生变化后, 经过多次迭代, 一致性算法仍然能够稳定收敛, 这说明了动态一致性算法具有较高的可靠性。

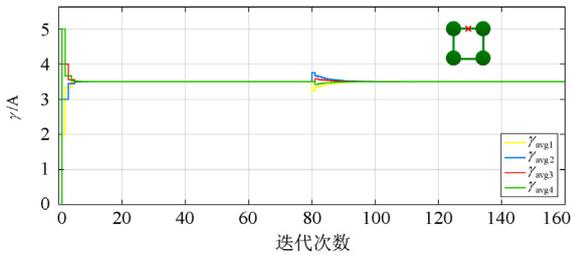


图 8 通信故障对一致性算法收敛性能的影响

Fig. 8 Influence of communication failure on convergence performance of consensus algorithm

## 4 仿真实验

为了验证所提控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 中搭建了如图 1 所示的独立光储直流微电网仿真模型。通过在不同时间段投切电阻, 模拟直流微电网中由于负载投切而产生的功率变化, 对光伏单元工作模式间的平滑切换效果和光伏单元工作在 CVD 模式下的功率分配效果进行验证。光伏电池和 Boost 电路仿真参数如表 2 和表 3 所示。

表 2 光伏电池仿真模型参数

Table 2 Simulation parameters of PV cell

参数	PV1	PV2	PV3
开路电压 $u_{oc}/V$	59.3	59.3	59.3
短路电流 $i_{sc}/A$	5.09	5.09	5.09
最大功率 $P_{mpp}/W$	440	660	880
串联等效电阻 $R_s/\Omega$	0.248	0.248	0.248
并联等效电阻 $R_{sh}/\Omega$	236	236	236
电池板串联数	1	1	1
电池板并联数	2	3	4

表 3 Boost 电路仿真参数

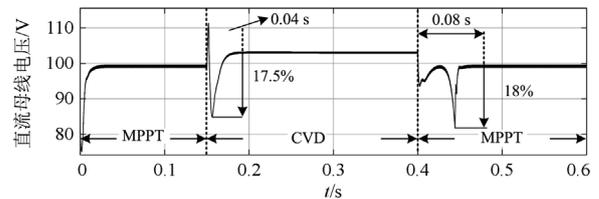
Table 3 Simulation parameters of Boost converter

参数	数值	参数	数值
电感 $L/mH$	5	母线电压调节环 PI 控制器 $k_{p2}+k_{i2}/s$	$0.8+270/s$
输入电容 $C_{pv}/\mu F$	10	二次调节环 PI 控制器 $k_p+k_i/s$	$1+30/s$
输出电容 $C_{dc}/\mu F$	500	输出额定电压/V	100
开关频率/kHz	25	母线电压给定值 $u_i^*/V$	103
dp/di 调节环 PI 控制器 $k_{p1}+k_{i1}/s$	$0.02+0.1/s$	母线电压参考值 $U_{dc\_ref}/V$	105

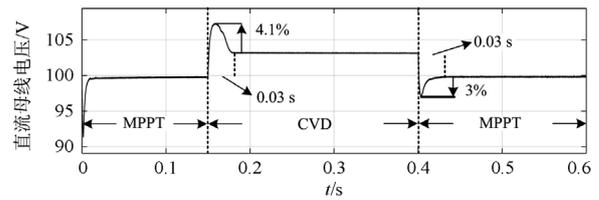
### 4.1 仿真实验 1

本实验分析了两台容量相同的光伏变换器并联运行时工作模式切换效果, 并将传统切换控制策略与本文所提切换控制策略进行对比。两组光伏电池的最大功率均为 440 W, 负载初始功率为 880 W。在初始阶段, 光伏转换器将在 MPPT 模式下运行。在  $t = 0.15$  s 时, 切除 400 W 负载, 光伏输出功率将大于负载消耗和储能单元充电的功率, 因此光伏变换器将切换到 CVD 模式。在  $t = 0.4$  s 时, 负载功率恢复到 880 W。

传统控制方法下直流母线电压仿真结果如图 9(a)所示。在模式切换过程中, 母线电压会产生剧烈的振荡。在 0.15 s 切除 400 W 负载时, 微电网功率过大, 母线电压急剧上升。当总线电压上升到 103 V 时, 光伏变换器切换到 CVD 模式。大约经过 0.04 s 的动态调节时间, 母线电压稳定在 103 V。同时, 在动态恢复过程中, 电压跌落约为 17.5%。在 0.4 s 负载恢复至 880 W, 光伏变换器从 CVD 模式切换到 MPPT 模式, 调节时间为 0.08 s, 超调可达 18%。因此, 不同控制回路之间的硬切换将对系统



(a) 传统切换控制策略



(b) 本文所提切换控制策略

图 9 直流母线电压仿真结果

Fig. 9 Simulation results of DC bus voltage

的稳定运行产生不利影响。本文所提出的平滑切换控制策略下母线电压仿真结果如图 9(b)所示。在模式切换过程中, 母线电压的动态过冲和跌落分别为 4.1%和 3%, 同时动态调节时间仅为 0.03 s。对比图 9(a)和图 9(b), 可以看出本文所提出的控制策略在母线电压调节方面具有更好的动态性能。

4.2 仿真实验 2

本实验分析了 3 台容量相同的光伏变换器并联运行在 CVD 模式下的功率分配效果, 并将传统下垂控制策略与本文所提自适应下垂控制策略进行对比。光照强度和环境温度分别设为 1 000 W/m<sup>2</sup> 和 25 °C, 3 组光伏电池的最大功率均为 440 W, 线路阻抗分别为 0.01 Ω、0.04 Ω、0.1 Ω。光伏电池输出功率仿真结果如图 10 所示, 在初始阶段, 光伏单元在 MPPT 模式下运行。在 t=0.1 s 时, 切除 600 W 负载, 此时光伏变换器将切换到 CVD 模式。从图中可以看出, 由于线路阻抗的差异, 导致光伏的输出功率分配存在误差。在 t=0.3 s 时, 加入所提的自适应下垂控制策略, 大约经过 0.03 s 的时间, 光伏的输出功率达到精确分配。并且在 t=0.4 s 时, 投入 200 W 负载, 3 组光伏电池的输出功率仍然能够按 1:1:1 的比例精确分配。

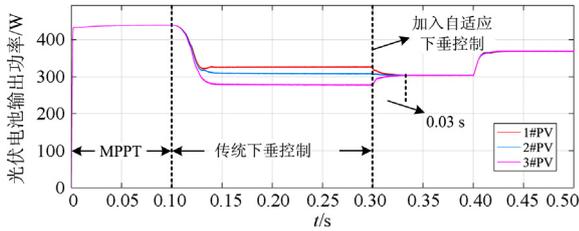


图 10 光伏电池输出功率仿真结果

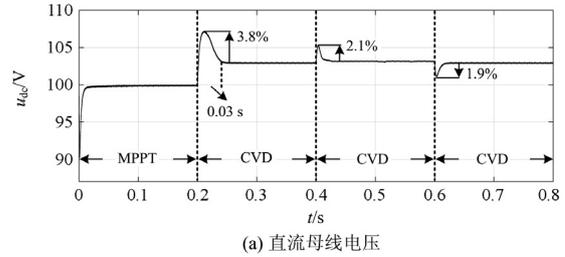
Fig. 10 Simulation results of PV cell output power

4.3 仿真实验 3

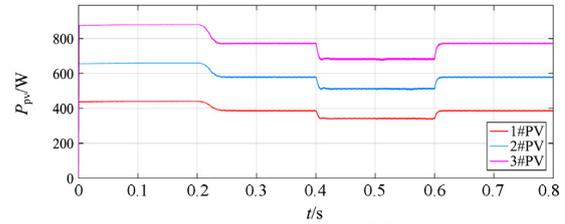
本实验分析了 3 台容量不同的光伏变换器并联运行的工作模式切换效果以及在 CVD 模式下的功率分配效果。光照和温度分别设置为 1 000 W/m<sup>2</sup> 和 25 °C, 3 组光伏电池的最大输出功率分别为 440 W、660 W 和 880 W, 线路阻抗分别为 0.01 Ω、0.05 Ω、0.12 Ω。负载初始功率设置为 1 980 W, 在 t=0.2 s 时, 切除 400 W 负载; 在 t=0.4 s 时, 再切除 200 W 负载; 在 t=0.6 s 后, 投入 200 W 负载。在初始阶段, 光伏单元将在 MPPT 模式下运行。在后 3 个阶段, 光伏单元以 CVD 模式运行。

直流母线电压和光伏电池输出功率仿真结果如图 11 所示。在 t=0.2 s 时, 光伏单元从 MPPT 模式切换至 CVD 模式。在模式切换期间, 动态电压过冲为 3.8%, 调节时间大约为 0.03 s, 切换过程平稳

无冲击。在 0.4~0.8 s 内, 光伏单元工作在 CVD 模式, 在负载变化的条件下, 直流母线电压动态过冲和跌落仅分别为 2.1%和 1.9%, 调节时间小于 0.02 s。负载变化条件下的光伏输出功率如表 4 所示, 光伏输出功率提供负载消耗后, 剩余部分提供给储能充电。在 0.2~0.8 s 内, 光伏电池的输出功率之比非常接近理想的功率分配比(1:1.5:2)。



(a) 直流母线电压



(b) 光伏电池输出功率

图 11 负载变化下 3 台光伏变换器并联输出性能

Fig. 11 Output performance of three paralleled PV converters under load change

表 4 负载变化下光伏电池输出功率

Table 4 Output power of PV under load change

时间/s	负载/W	PV1/W	PV2/W	PV3/W	功率分配比
0~0.2	1 980	440	660	880	1:1.5:2
0.2~0.4	1 580	386	577	770	1:1.495:1.995
0.4~0.6	1 380	341	511	680	1:1.498:1.994
0.6~0.8	1 580	386	577	770	1:1.495:1.995

在所提出的平滑切换控制策略的作用下, 光伏变换器在两种工作模式之间的切换过程快速而稳定。直流母线电压平滑过渡, 无大幅的电压过冲或急剧下降。同时, 加入基于二次调节的自适应下垂控制策略, 实现多个光伏变换器之间的功率精确分配, 使每个光伏变换器可以按比例输出功率。

4.4 仿真实验 4

太阳能具有随机性和间歇性的特点, 因此随着光照强度的变化, 光伏单元可能会在 MPPT 和 CVD 模式之间频繁切换。本实验分析了在光照强度变化的条件下, 3 台不同容量的光伏变换器并联运行带恒功率负载时工作模式切换效果以及在 CVD 模式下的功率分配效果。初始光照强度和温度分别设置为 500 W/m<sup>2</sup> 和 25 °C, 3 组光伏电池的最大输出功

率分别为 216 W、324 W 和 432 W，线路阻抗分别为 0.01  $\Omega$ 、0.05  $\Omega$ 、0.12  $\Omega$ 。在初始阶段，光伏单元以 MPPT 模式运行。在  $t = 0.2$  s 时，光照强度增加到 750 W/m<sup>2</sup>，此时光伏单元输出功率将大于负载消耗和储能充电的功率，因此光伏单元将切换至 CVD 模式。在  $t = 0.4$  s 时，光照强度恢复到 500 W/m<sup>2</sup>。

在光照强度变化以及带恒功率负载的条件下，光伏电池输出功率和直流母线电压仿真结果如图 12 所示。在模式切换过程中，调节时间大约为 0.04 s，母线电压动态过冲和跌落分别为 4.3% 和 1.1%，光伏电池输出功率也具有较好的动态性能，切换过程平滑无冲击。在  $t = 0.2$  s 时，光伏电池输出功率有一个在突然增加后逐渐稳定的过程。实际上，这是  $dp/di$  控制器跟踪正  $dp/di$  参考值的过程。光照变化条件下的光伏输出功率如表 5 所示，在 CVD 模式下，光伏电池输出功率之比约为 1:1.496:1.996，比较接近理想的功率容量比。结合图 12(a)和图12(b)可以看出，当光伏输出功率因光照强度变化而发生较大变化时，所提出的控制策略仍能实现两种工作模式间的平滑切换，并且能够实现 CVD 模式下光伏变换器之间的功率精确分配。

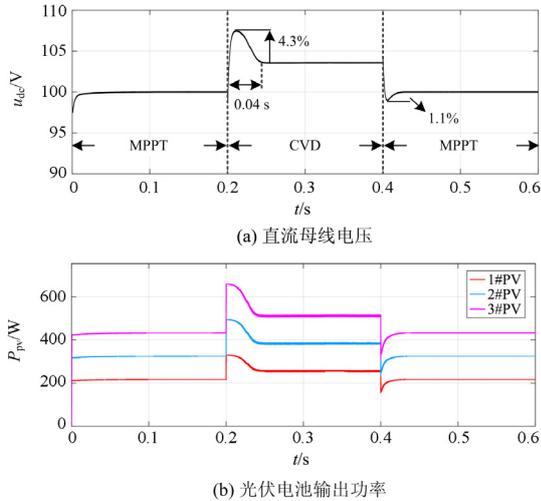


图 12 光照变化下 3 台光伏变换器并联带恒功率负载的输出性能

Fig. 12 Output performance of three paralleled PV converters with constant power load under solar irradiation change

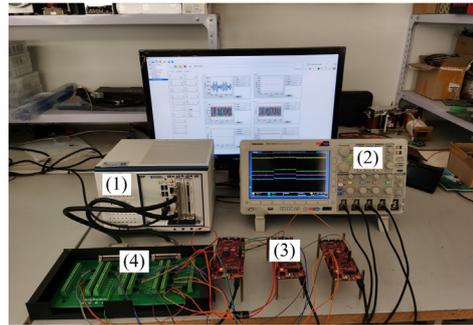
表 5 光照变化下光伏电池输出功率

Table 5 Output power of PV under changed solar irradiation

时间/s	光强/(W/m <sup>2</sup> )	PV1/W	PV2/W	PV3/W	功率分配比
0-0.2	500	216	324	432	1:1.5:2
0.2-0.4	750	256	383	511	1:1.496:1.996
0.4-0.6	500	216	324	432	1:1.5:2

## 5 实验验证

为了进一步验证本文所提控制策略的有效性，搭建了如图 13 所示的基于 HIL 的实验平台。独立光储直流微电网包括光伏单元、储能单元、线路阻抗、直流母线和负载等，由基于 NI-PXIe-FPGA-7846R 的硬件在环仿真器模拟。每个光伏变换器的控制器采用基于 TMS320F28379D 的 DSP 控制。实验分别验证了光伏变换器工作模式切换的效果和在 CVD 模式下不同容量的光伏变换器功率分配效果。



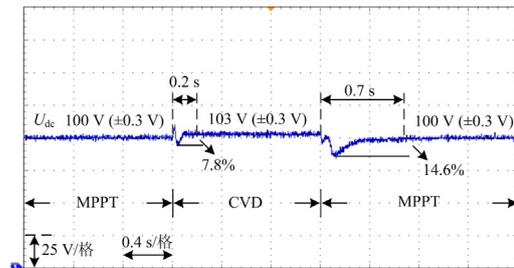
(1) 硬件在环实时仿真器 (2) 示波器  
(3) 变换器控制器 (4) IO接口

图 13 基于 HIL 的实验平台

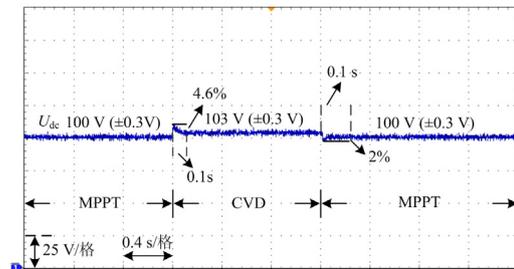
Fig. 13 Experimental platform based on HIL

### 5.1 实验 1

首先验证两台容量相同的光伏变换器并联运行时工作模式切换效果，并与传统切换控制策略作对比。直流母线电压实验结果如图 14 所示。



(a) 传统控制策略下母线电压



(b) 所提控制策略下母线电压

图 14 光伏单元工作模式切换实验

Fig. 14 Experiment results of PV unit working mode switching

在传统控制策略下,当负载功率从 880 W 变为 440 W 时,光伏变换器切换到 CVD 模式。直流母线电压发生振荡,动态调节时间为 0.2 s。当负载功率恢复到 880 W 时,光伏变换器从 CVD 模式切换到 MPPT 模式。在动态恢复过程中,电压跌落约 14.6%,恢复时间约 0.7 s。而在所提出的控制方法下,母线电压的最大过冲约为 4.6%,动态跌落仅为 2%,由模式切换引起的动态调节时间仅为 0.1 s。

5.2 实验 2

本实验分析了 3 台不同容量的光伏变换器在负载变化条件下的模式切换性能以及变换器工作在 CVD 模式下的功率分配效果。光伏电池输出功率和母线电压实验结果如图 15 所示。当光伏单元从 MPPT 模式切换至为 CVD 模式时,母线电压超调约为 2.6%,调节时间仅为 0.14 s。光伏单元工作在 CVD 模式下,在 III 和 IV 阶段分别切除和投入 200 W 负载,母线电压过冲和跌落分别为 1.8%和 1.7%,调节时间不超过 0.1 s。同时在稳态下,母线电压几乎没有变化,维持在 103 V。此外,光伏电池输出功率的实验结果如表 6 所示。可以看出,在模式切换过程中,光伏电池输出功率和母线电压可以平稳快速地过渡。在 CVD 模式下,光伏电池的输出功率可以按照额定容量比 1:1.5:2 精确分配。

表 6 负载变化下光伏电池输出功率

Table 6 Output power of PV under load change

阶段	工作模式	PV1/W	PV2/W	PV3/W	功率分配比
I	MPPT	440	660	880	1:1.5:2
II	CVD	385	576	768	1:1.496:1.995
III	CVD	338	506	675	1:1.497:1.997
IV	CVD	385	576	768	1:1.496:1.995

5.3 实验 3

本实验分析了 3 台不同容量的光伏变换器在光照变化条件下带恒功率负载时的模式切换性能以及变换器工作在 CVD 模式下的功率分配效果。光伏电池输出功率和母线电压实验结果如图 16 所示。当光照强度从 500 W/m<sup>2</sup> 变化到 750 W/m<sup>2</sup> 时,光伏单元输出功率大于负载消耗和储能充电的功率,光伏单元需要降低功率在 CVD 模式下运行。在瞬态过程中,动态调节时间约为 0.18 s,动态电压超调约为 3.9%。当光照强度降低至 500 W/m<sup>2</sup> 时,光伏单元切换到 MPPT 模式,母线电压动态跌落约为 0.6 V,恢复时间仅为 0.1 s。可以看出,光伏输出功率和母线电压在光照变化以及带恒功率负载的条件下也具有较好的动态性能。光伏电池输出功率的实验结果如表 7 所示,在 CVD 模式下光伏电池的输出功率之比约为 1:1.496:1.996,非常接近理想的功率分配比。

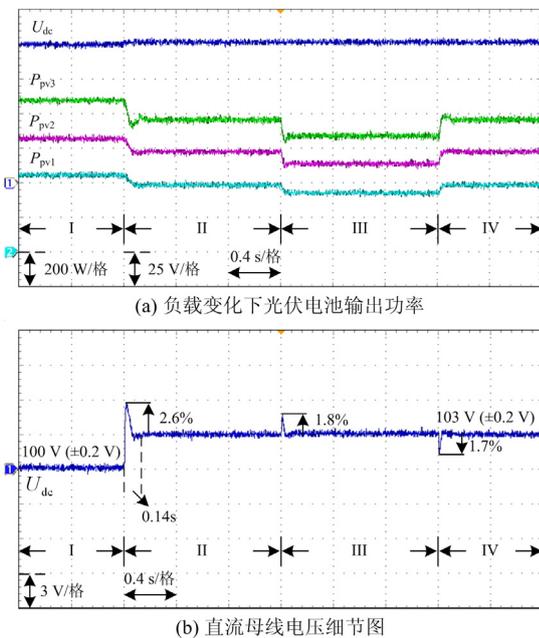


图 15 负载变化下 3 台光伏变换器并联实验  
Fig. 15 Experiment results of three paralleled PV converters under load change

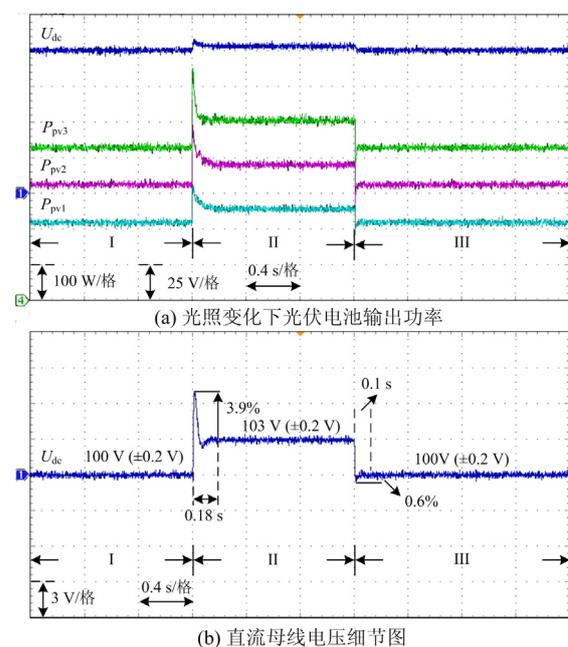


图 16 光照变化下 3 台光伏变换器并联带恒功率负载实验  
Fig. 16 Experiment results of three paralleled PV converters with constant power load under solar irradiation change

表 7 光照变化下光伏电池输出功率

时间/s	光强/(W/m <sup>2</sup> )	PV1/W	PV2/W	PV3/W	功率分配比
0~0.2	500	216	324	432	1:1.5:2
0.2~0.4	750	254	380	507	1:1.496:1.996
0.4~0.6	500	216	324	432	1:1.5:2

以上实验结果表明,无论是在电阻负载还是恒功率负载条件下,所提出的光伏单元控制策略模式切换过程平滑稳定,有效解决了在 CVD 模式下由线路阻抗差异造成的功率精确分配问题。

## 6 结论

本文首先针对光伏单元运行过程中工作模式切换造成的母线电压波动问题,提出一种新型模式平滑切换策略。根据光伏电池的输出特性曲线,将  $dp/di$  作为控制变量,光伏单元工作模式的切换可通过跟踪光伏电池不同的  $dp/di$  值来完成。与传统切换控制策略相比,不存在控制环路的切换,使用一种控制环路统一了 MPPT 模式与 CVD 模式。在此基础上,针对光伏单元工作在 CVD 模式下,由于线路阻抗的差异造成的功率精确分配问题,提出一种基于二次调节的自适应下垂控制策略,设计了包含光伏电池输出功率和变换器输出电流信息的  $\gamma$  因子,以消除线路阻抗差异对功率分配精度的影响,实现功率精确分配。此外,每个光伏单元仅通过稀疏通信网络与相邻单元交换信息,并使用动态一致性算法实现全局平均信息的稳定收敛。最后,搭建了直流微电网仿真模型和基于 HIL 的实验平台。仿真和实验结果表明,所提出的控制策略可以实现光伏单元工作模式的切换过程平滑无冲击,并提高在 CVD 模式下光伏单元的功率分配精度,保证了系统的动态性能和稳定性。

## 参考文献

- [1] 李霞林, 王成山, 郭力, 等. 直流微电网稳定控制关键技术研究综述[J]. 供用电, 2015, 32(10): 1-14.  
LI Xialin, WANG Chengshan, GUO Li, et al. A review on the key stability control technologies of DC microgrid[J]. Distribution & Utilization, 2015, 32(10): 1-14.
- [2] DRAGICEVIC T, LU Xiaonan, VASQUEZ J C, et al. DC microgrids—part II: a review of power architectures, applications, and standardization issues[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(5): 3528-3549.
- [3] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.  
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [4] 姜碧佳, 叶远茂. 直流微电网的控制技术综述[J]. 广东电力, 2020, 33(5): 1-10.  
JIANG Bijia, YE Yuanmao. Overview on control techniques of DC micro-grid[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(5): 1-10.
- [5] 张宇涵, 杜贵平, 雷雁雄, 等. 直流微网混合储能系统控制策略现状及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 177-188.  
ZHANG Yuhan, DU Guiping, LEI Yanxiong, et al. Current status and prospects of control strategy for a DC micro grid hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 177-188.
- [6] 张犁, 孙凯, 吴田进, 等. 基于光伏发电的直流微电网能量变换与管理[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 248-254.  
ZHANG Li, SUN Kai, WU Tianjin, et al. Energy conversion and management for DC microgrid based on photovoltaic generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 248-254.
- [7] 徐四勤, 王明渝, 马兰珍, 等. 独立光伏发电直流网能量管理控制策略[J]. 现代电力, 2013, 30(4): 1-6.  
XU Siqin, WANG Mingyu, MA Lanzhan, et al. Energy management and control strategy for stand-alone photovoltaic power generation DC network[J]. Modern Electric Power, 2013, 30(4): 1-6.
- [8] 王盼宝, 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.
- [9] ZENG Hongmei, ZHAO Hailin, QIANG Yang, et al. Coordinated energy management in autonomous hybrid AC/DC microgrids[C] // IEEE International Conference on Power System Technology, October 20-22, 2014, Chengdu, China: 3186-3193.
- [10] 郭洪智, 张勤进, 刘彦呈, 等. 基于滑模的直流微电网光伏系统无缝切换策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(8): 13-20.  
GUO Hongzhi, ZHANG Qinjin, LIU Yancheng, et al. Seamless switching control strategy for photovoltaic system in DC microgrid based on sliding mode control[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(8): 13-20.
- [11] EGHTEHDARPOUR N, FARJAH E. Control strategy for distributed integration of photovoltaic and energy storage systems in DC micro-grids[J]. Renewable Energy, 2012, 45(3): 96-110.
- [12] SUN Kai, ZHANG Li, XING Yan, et al. A distributed

- control strategy based on DC bus signaling for modular photovoltaic generation systems with battery energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(10): 3032-3045.
- [13] WANG Panbao, YANG Xu, WANG Wei, et al. A seamless switching control strategy of photovoltaic units in droop-controlled DC microgrids[C] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 20-24, 2015, Montreal, QC, Canada: 6206-6211.
- [14] AUGUSTINE S, MISHRA M K, LAKSHMINARASAMMA N. Adaptive droop control strategy for load sharing and circulating current minimization in low-voltage standalone DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(1): 132-141.
- [15] NASIRIAN V, DAVOUDI A, LEWIS F, et al. Distributed adaptive droop control for DC distribution systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 944-956.
- [16] 喻思, 米阳, 马宇辰, 等. 自适应高通滤波下垂控制的孤岛直流微电网功率分配控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 19-26.  
YU Si, MI Yang, MA Yuchen, et al. Power distribution control of an island DC microgrid based on adaptive high-pass filter droop control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 19-26.
- [17] XIA Yanghong, WEI Wei, PENG Yonggang, et al. Decentralized coordination control for parallel bidirectional power converters in a grid-connected DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6850-6861.
- [18] 杨捷, 金新民, 吴学智, 等. 一种适用于直流微电网的改进型电流负荷分配控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 59-67.  
YANG Jie, JIN Xinmin, WU Xuezhong, et al. An improved load current sharing control method in DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 59-67.
- [19] WANG Panbao, LU Xiaonan, YANG Xu, et al. An improved distributed secondary control method for DC microgrids with enhanced dynamic current sharing performance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(9): 6658-6673.
- [20] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 72-84.  
ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 72-84.
- [21] 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研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3919-3927.  
YANG Qiufan, HUANG Yubin, SHI Mengxuan, et al. Consensus based distributed control for multiple PV-battery storage units in a DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3919-3927.
- [22] MORSTYN T, SAVKIN A, HREDZAK B, et al. Multi-agent sliding mode control for state of charge balancing between battery energy storage systems distributed in a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(5): 4735-4743.
- [23] 张勤进, 张博, 刘彦呈, 等. 基于低频电流注入的船舶直流微电网线路阻抗检测[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 134-140.  
ZHANG Qinjin, ZHANG Bo, LIU Yancheng, et al. A line impedance detection of a ship DC microgrid based on low frequency current injection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 134-140.
- [24] 张良, 闫凯宏, 冷祥彪, 等. 基于 SOC 下垂控制的独立直流微电网协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 87-97.  
ZHANG Liang, YAN Kaihong, LENG Xiangbiao, et al. Research on coordinated control strategy of an autonomous DC microgrid based on SOC droop control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 87-97.
- [25] CAI Hongda, XIANG Ji, WEI Wei, et al. V-dp/dv droop control for PV sources in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7708-7720.
- [26] PANDIARAJAN N, MUTHU R. Mathematical modeling of photovoltaic module with Simulink[C] // 2011 1st International Conference on Electrical Energy Systems, January 3-5, 2011, Chennai, India: 258-263.
- [27] VILLALVA M G, RUPPERT F E. Input-controlled buck converter for photovoltaic applications: modeling and design[C] // 4th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, April 2-4, 2008, York, UK.
- [28] ZHANG Qinjin, ZENG Yuji, LIU Yancheng, et al. An improved distributed cooperative control strategy for multiple energy storages parallel in islanded DC microgrid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(1): 455-468.
- [29] MENG Lexuan, DRAGICEVIC T, ROLDAN-PEREZ J, et al. Modeling and sensitivity study of consensus algorithm-based distributed hierarchical control for DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(3): 1504-1515.

收稿日期: 2021-08-08; 修回日期: 2021-09-15

作者简介:

张勤进(1983—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为直流微电网、船舶直流综合电力系统; E-mail: zqj20@dlmu.edu.cn

胡王宝(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为直流微电网控制与优化技术。E-mail: hwb97@qq.com

(编辑 魏小丽)