

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201180

## 一种基于一致性算法的改进下垂控制策略

张莹<sup>1</sup>, 孟润泉<sup>1</sup>, 王子昂<sup>1</sup>, 韩肖清<sup>1</sup>, 王金浩<sup>2</sup>, 刘翼肇<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学电力系统运行与控制山西重点实验室, 山西 太原 030024;

2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030012)

**摘要:** 当微电网运行于孤岛模式时, 分布式电源可通过下垂控制实现功率的自主分配。由于传统的基于解耦模型的下垂控制忽略了线路阻抗不一致的影响, 从而导致功率分配不均以及环流的问题, 影响了分布式电源的效率, 甚至会造成分布式电源过载。针对以上问题, 提出一种基于一致性算法的改进下垂控制策略。该方法利用相邻通信获取逆变器输出无功信息, 本地控制器通过一致性算法对各逆变器间无功差值进行动态修正直至偏差趋于零, 在减少通信量的同时实现了无功功率的精确分配。在 Matlab/Simulink 仿真平台搭建模型, 通过与传统控制策略的比较, 验证了所提控制策略的有效性。

**关键词:** 分布式电源; 逆变器; 下垂控制; 一致性算法; 相邻通信

### An improved droop control strategy based on a consensus algorithm

ZHANG Ying<sup>1</sup>, MENG Runquan<sup>1</sup>, WANG Ziang<sup>1</sup>, HAN Xiaoqing<sup>1</sup>, WANG Jinhao<sup>2</sup>, LIU Yizhao<sup>2</sup>

(1. Shanxi Key Lab of Power System Operation and Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030012, China)

**Abstract:** When a microgrid operates in island mode, distributed generation can realize autonomous power distribution through droop control. The traditional droop based on a decoupling system model ignores the influence of line impedance inconsistencies, resulting in uneven power distribution and circulating current problems. These affect the efficiency of distributed generation, and may even cause distributed generation overload. In response to the above problems, this paper proposes an improved droop control strategy based on a consensus algorithm. This method uses adjacent communication to obtain the reactive power output information of the inverters. The local controller dynamically corrects the reactive power difference between inverters through the consensus algorithm until the deviation approaches zero. This enables the precise distribution of reactive power while reducing the amount of communication. The model is built on the Matlab/Simulink simulation platform, and the effectiveness of the proposed control strategy is verified by comparing with traditional control strategies.

This work is supported by the Science and Technology Major Program of Shanxi Province (No. 20181102028), the Science and Technology Project of State Grid Shanxi Electric Power Company (No. 520530180011) and the National Natural Science Foundation of China (No. U1610121).

**Key words:** distributed generation; inverter; droop control; consensus algorithm; adjacent communication

## 0 引言

相比于传统的集中式发电, 分布式电源 (Distributed Generation, DG) 更加方便灵活, 其分布

广泛, 不受地域限制, 并且更为环保, 具有重要的研究价值和应用前景<sup>[1-4]</sup>。

微电网由 DG、储能、变换器、负荷以及相应的保护装置汇集而成, 其独立自主稳定可靠的优点为具有灵活发电优势的 DG 解决了可靠接入的问题, 使 DG 得到有效的利用<sup>[5-9]</sup>。为提高微电网的供电容量和系统的可靠性, 一般采用多个 DG 并联的运行方式, 逆变器作为 DG 与微电网连接的接口,

基金项目: 山西省科技重大专项 (20181102028); 国网山西省电力公司科技项目 (520530180011); 国家自然科学基金项目 (U1610121)

需要更为有效的控制方式<sup>[10-12]</sup>。

在并联逆变器的控制方法中,下垂控制策略具有其独特的优势,其控制策略简单,方便系统扩容,并且技术成熟,在实现即插即用能力的同时可提高系统可靠性<sup>[13-17]</sup>。但其存在固有缺陷:传统下垂控制采用的是公共结点(Point of Common Coupling, PCC)的电压,在实际微电网中, DG 的位置比较分散,受传输距离的影响,母线电压不受直接控制,会引起电压偏差;在低压微电网中,线路阻抗呈阻性,微电网就不再是完全解耦子系统,造成功率耦合;不同 DG 与 PCC 距离不相同,受线路阻抗的影响,逆变器输出电压不同,导致系统出现环流, DG 不能按其容量均衡分配,可能导致机组过载甚至整个系统的崩溃<sup>[18-21]</sup>。

为解决上述问题,国内外学者提出各种改进的下垂控制策略<sup>[15]</sup>。文献[22]采用虚拟阻抗法,将逆变器等效为串联输出阻抗的电压源,在研究不同运行方式下输出阻抗特性的基础上,提出一种结合虚拟阻抗和逆变器输出电流前馈的控制方法,为了防止电压降落,还加入了电压幅值控制回路,提高了无功功率的分配精度,但是这种方法没有考虑本地负荷的影响。采用优化智能控制算法来改进下垂控制,比如遗传算法、模糊算法和粒子群算法。文献[23]采用优化粒子群算法,通过下垂控制模块将线路的偏差信息输入到粒子群算法模块,经粒子群算法模块分析后实时调整下垂控制系数,可以解决功率偏差和环流问题,但是没有对信息的获取途径进行说明。文献[24]利用集中通信,提出一种具有网络自适应能力的改进下垂控制,通过低带宽通信获取其他逆变器输出的有功信息,在传统下垂控制中叠加积分跟随项,自适应平移下垂曲线解决功率均分问题,这种方法依赖中央控制器,当通信中断时,系统的可靠性降低,并且需要高昂的建设成本和复杂的通信链路。为此,本文采用一种利用相邻通信的控制策略,非常适合微电网控制,具有更高的灵活性和鲁棒性。而且,随着通信技术的快速发展,适量信息的引入也可大大提高系统的控制性能。

本文在建立数学模型的基础上,分析了线路阻抗不匹配对功率分配的影响,指出传统下垂控制的固有缺陷。在此基础上,提出了一种基于一致性算法的控制策略,通过相邻逆变器的信息交互得到补偿量,自适应地平移下垂曲线补偿线路阻抗失配的影响,相比于集中控制,更为灵活可靠。最后,在 Matlab/Simulink 平台进行仿真,验证了所提控制策略的有效性。

## 1 并联逆变器结构与传统下垂控制

图 1 为并联逆变器系统结构图,  $DG_i(i=1,2)$  等效为直流源,  $L_{fi}$  和  $C_{fi}$  分别为滤波电感和滤波电容,  $Z_{linei}$  为线路等效阻抗,  $Z_{load}$  为负载。图 2 为图 1 的简化模型,  $U_i \angle \phi_i$  为逆变器输出电压,  $U_{pcc} \angle 0^\circ$  为交流母线电压,  $R_i$  为逆变器等效输出电阻与线路等效电阻之和,  $X_i$  为逆变器等效输出感抗与线路等效感抗之和。

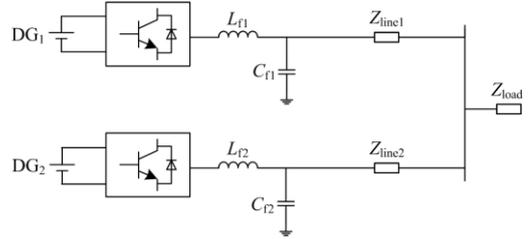


图 1 并联逆变器系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of parallel inverter system

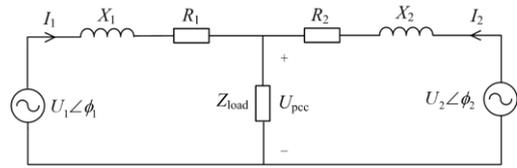


图 2 并联逆变器简化模型

Fig. 2 Simplified model of parallel inverter

由图 2 可得逆变器输出电流为

$$\dot{I}_i = \frac{U_i \angle \phi_i - U_{pcc} \angle 0^\circ}{R_i + jX_i} \quad (1)$$

逆变器输出功率为

$$S_i = U_i \angle \phi_i \times \dot{I}_i^* \quad (2)$$

实际中  $\phi_i$  很小,可近似认为  $\sin \phi_i = \phi_i$ ,  $\cos \phi_i = 1$ ,由此可得等效输出阻抗分别为阻性、感性、阻感性时逆变器的输出功率,如表 1 所示。

表 1 等效输出阻抗与逆变器输出功率关系

Table 1 Relationship between equivalent output impedance and inverter output power

等效输出阻抗	逆变器输出功率
阻性	$P_i = \frac{U_i(U_i - U_{pcc})}{R_i}, Q_i = \frac{U_i U_{pcc} \phi_i}{R_i}$
感性	$P_i = \frac{U_i U_{pcc} \phi_i}{X_i}, Q_i = \frac{U_i(U_i - U_{pcc})}{X_i}$
阻感性	$P_i = \frac{U_i R_i (U_i - U_{pcc} \cos \phi_i) + U_i U_{pcc} X_i \sin \phi_i}{R_i^2 + X_i^2}$
	$Q_i = \frac{U_i X_i (U_i - U_{pcc} \cos \phi_i) - U_i U_{pcc} R_i \sin \phi_i}{R_i^2 + X_i^2}$

因线路阻抗和逆变器的等效输出阻抗呈感性,为更好地适应线路特性,可得下垂控制表达式为

$$\omega_i = \omega_i^* - m(P_i^* - P_i) \quad (3)$$

$$U_i = U_i^* - n(Q_i^* - Q_i) \quad (4)$$

式中:  $U_i^*$ 、 $\omega_i^*$  分别为基点电压和频率;  $U_i$ 、 $\omega_i$  分别为电压和频率的参考值;  $P_i^*$ 、 $Q_i^*$  分别为基点电压和频率时逆变器输出的有功和无功功率;  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为逆变器实际输出的有功和无功功率;  $m$ 、 $n$  为相应的下垂系数。

在含有并联逆变器的微电网中,受逆变器本身参数以及线路阻抗不同的影响,逆变器有不同的输出电压,由逆变器输出功率的表达式可得

$$U_i = U_{pcc} + \frac{X_i}{U_i} Q_i \quad (5)$$

进而造成无功功率分配不均衡以及环流的问题,由于系统频率是全局变量,与之对应的有功则可以实现功率均衡分配。

如图3所示,以两个并联的逆变器为例,当逆变器采用相同的下垂控制曲线而等效输出阻抗不同时,由式(5)可得,两个逆变器有不同的线路特性曲线,与下垂曲线的交点为逆变器实际工作点,两个逆变器具有较大的无功输出偏差  $\Delta Q$ 。通过增大下垂系数,可以提高功率的分配精度,但是输出电压偏差会增大,严重时会影响系统的稳定。

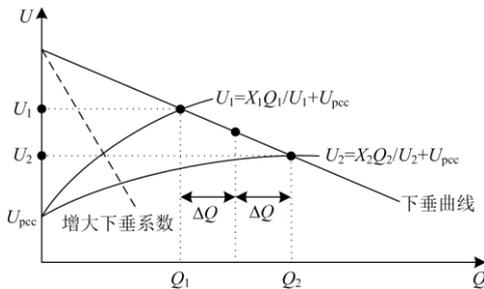


图3 线路参数不同时无功分配偏差

Fig. 3 Reactive power distribution deviation when line parameters are different

## 2 基于一致性算法的改进下垂控制策略

为了改善功率分配性能,需要在子系统间建立通信,通信的引入使得子系统的控制不再分散,并且适当通信也会大大提高系统的控制性能。控制方式主要有两种,集中式控制和分布式控制。对于集中式控制,其对中央控制器的依赖使得下垂控制失去了即插即用的性能,并且单点故障会降低系统的可靠性。对于分布式控制,其中央控制器是可有可无的,只需相邻子系统间的信息交互,相比于集中

式控制,具有更高的灵活性和可靠性,即使丢失部分信息,仍可实现系统的稳定运行。因此,本文采用基于一致性算法的分布式控制,在实现即插即用特性的基础上,提高了系统无功功率的分配精度。

### 2.1 一致性算法

一致性控制由 Reza Olfati-saber 等人提出,其一致性是指,一个多智能体系统中所有的智能体通过相邻信息的交互,达到某个状态的一致。多智能体系统可表示为一个图,  $G = \{V, E\}$ ,  $V = \{1, 2, \dots, N\}$  表示节点集,  $E \subseteq V \times V$  表示节点边集,即节点间的通信线路。  $A = [a_{ij}]_{n \times n}$  为邻接矩阵,当节点  $i$  与  $j$  之间存在通信时  $a_{ij}=1$ ,不存在通信时  $a_{ij}=0$ ,主对角线元素为 0。

基本表达式如下:

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} [x_i(t) - x_j(t)] \quad (6)$$

式中,  $x_i(t)$  为节点  $i$  的一致性变量,这里选取逆变器输出的无功偏差为一致性变量。这样不同容量的 DG 也可以有统一的参考值,因此控制方式更为灵活。

### 2.2 改进下垂控制

根据前文分析可知,逆变器输出无功会受到线路参数不同的影响,为适应复杂的微电网结构,提高无功功率分配精度,本文提出一种基于一致性算法的改进下垂控制策略,其控制框图如图4所示,主要包括三个部分:下垂控制、电压和电流双闭环控制<sup>[25]</sup>。下垂控制得到输出电压的参考值,电压环保证输出电压稳定,电流环提高电能质量,提升系统的响应速度。

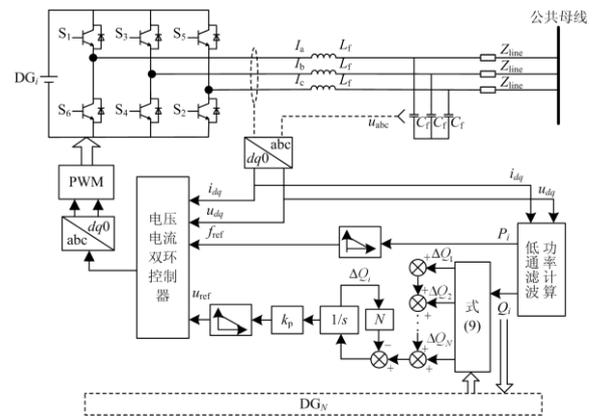


图4 基于一致性算法的改进下垂控制框图

Fig. 4 Block diagram of improved droop control based on consensus algorithm

式(7)为其控制表达式。

$$\begin{cases} U_i = U_i^* - n(Q_i^* - Q_i) + \Delta U_i \\ f_i = f_i^* - m(P_i^* - P_i) \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$\Delta U_i = k_p (Q_{\text{ref}i} - Q_i) \quad (8)$$

$$\Delta Q_i = Q_{\text{ref}i} - Q_i \quad (9)$$

$$\frac{d\Delta Q_i}{dt} = \sum_{j=1}^N (\Delta Q_i - \Delta Q_j) \quad (10)$$

式中,  $k_p$  为比例控制增益。

当各 DG 容量相同时

$$Q_{\text{ref}i} = \frac{Q_{\text{load}}}{N} \quad (11)$$

式中:  $k_p$  为比例控制增益;  $Q_{\text{ref}i}$  为逆变器应该输出的无功功率;  $\Delta Q_i$  为需要补偿的无功偏差。

当各 DG 容量不同时

$$Q_{\text{ref}i} = \frac{S_i}{S_1 + S_2 + \dots + S_N} Q_{\text{load}} \quad (12)$$

式中,  $S_i$  为各 DG 额定容量。

其控制过程: 电压、电流传感器用来获取逆变器输出的电压、电流信息, 经过低通滤波器得到有功和无功功率的平均值; 有功功率  $P_i$  进入下垂控制器得到频率的参考值  $f_i^*$ ; 利用稀疏通信获取相邻逆变器输出无功信息, 计算其参考无功与实际输出无功功率的差值; 逆变器  $i$  与其相邻逆变器无功差值的偏差连续相加, 获取需补偿的无功偏差  $\Delta Q_i$ ; 经比例增益获取电压补偿量  $\Delta U_i$ ,  $\Delta U_i$  持续协助下垂控制抑制无功偏差; 通过 Q-V 下垂控制, 产生电压内环的参考幅值; 进入电压电流双环控制器, 产生  $dq0$  坐标系下的调制波, 坐标变换后通过 PWM 生成逆变器门信号。

由以上分析可知, 一致性控制的目标是使所选取的一致性变量统一到一个唯一的值, 这里以不同容量的两个 DG 为例, 当  $S_2 = 2S_1$  时

$$\Delta Q_1 = \frac{1}{3} Q_{\text{load}} - Q_1 \quad (13)$$

$$\Delta Q_2 = \frac{2}{3} Q_{\text{load}} - Q_2 \quad (14)$$

尽管 DG 容量不同, 逆变器应发出的无功功率参考值不同, 控制的目标仍是使逆变器输出的参考无功与实际无功功率的偏差趋于 0, 即  $\Delta Q_1 = \Delta Q_2 = 0$ 。这种一致性变量的选取以相对值取代了传统的绝对值, 可以应对不同容量的 DG, 具有更好的灵活性和可靠性。

### 3 仿真结果及分析

为验证所提控制策略, 在 Matlab/Simulink 仿真平台搭建如图 1 所示的系统结构和控制电路仿真模型。具体仿真参数如表 2 所示。通过仿真, 在负载

表 2 系统参数

参数	数值
直流电压 $U_{\text{DC}}$	800 V
电压幅值 $U_i^*$	380 V
频率幅值 $f_i^*$	50 Hz
滤波电感 $L_f$	5 mH
滤波电容 $C_f$	50 $\mu\text{F}$
工况 1、3 DG <sub>1</sub> 线路阻抗 $Z_{\text{line}1}$	0.642 $\Omega$ +0.0264 mH
工况 1、3 DG <sub>2</sub> 线路阻抗 $Z_{\text{line}2}$	0.642 $\Omega$ +0.0264 mH
工况 2、4 DG <sub>1</sub> 线路阻抗 $Z_{\text{line}1}$	0.642 $\Omega$ +0.0264 mH
工况 2、4 DG <sub>2</sub> 线路阻抗 $Z_{\text{line}2}$	1.284 $\Omega$ +0.0528 mH

投切情况均相同时, 对 DG 容量和线路阻抗的差异进行了四种工况下传统与改进下垂控制策略的比较, 说明所提控制策略对无功功率精确分配和环流抑制的有效性。

工况 1: 两并联 DG 容量相同、线路阻抗相同

两个容量和线路阻抗均相同的 DG 并联运行, 公共负载连接在交流母线上, 在 0~0.5 s 时投入负载 10 kW、4 kvar, 在 0.5 s 时增加负载至 20 kW、8 kvar。

当采用传统下垂控制和改进下垂控制时, 逆变器的输出有功、无功和 A 相电流仿真波形分别如图 5(a)、(b)、(c)和图 6(a)、(b)、(c)所示。由仿真结果

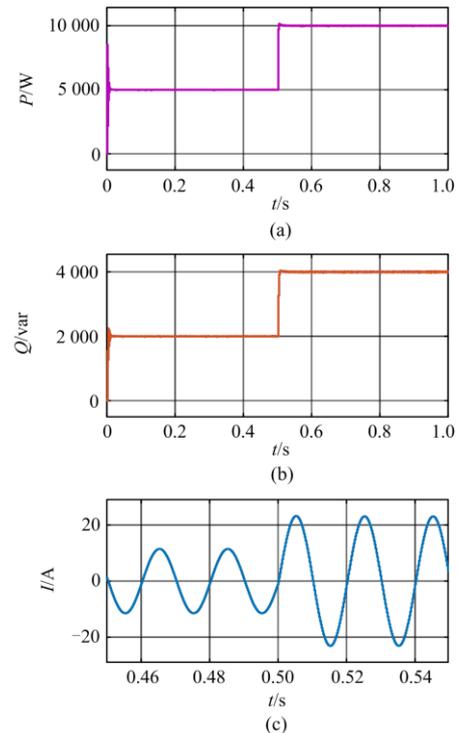


图 5 工况 1 下传统下垂控制仿真波形

Fig. 5 Simulation waveforms of traditional droop control under working condition 1

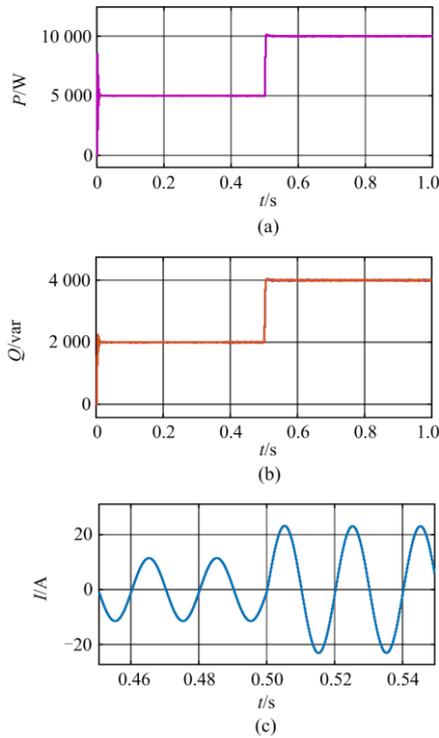


图 6 工况 1 下改进下垂控制仿真波形

Fig. 6 Improved droop control simulation waveform under working condition 1

可知, 不论采用哪种控制方法, 两逆变器各输出值均相等, 即有功、无功均可以实现功率均分, 并且无环流, 在 0.5 s 增加负载, 微电网进入新的稳定运行状态。

工况 2: 两并联 DG 容量不同、线路阻抗相同

当 DG<sub>1</sub> 的容量为 DG<sub>2</sub> 容量的 2 倍且线路阻抗相同, 采用传统下垂控制时, 逆变器输出的有功、无功波形分别如图 7(a)、图 7(b)所示, 有功可以均衡分配, 而无功差别却很大, 有明显的分配偏差。逆变器的 A 相输出电流波形如图 7(c)所示, 由仿真结果可知, 由于两逆变器输出电压不一致, 造成电流差异, 产生环流。

采用改进下垂控制后, 在一致性调节器的作用下, 逆变器的无功输出可以实现按比例分配, 此时, 逆变器间的环流问题也得到了明显改善, 负荷投切情况与工况 1 相同, 此时逆变器的输出有功、无功和 A 相电流波形分别如图 8(a)、(b)、(c)所示。

工况 3: 两并联 DG 容量相同、线路阻抗不同

此时, DG<sub>2</sub> 的线路阻抗为 DG<sub>1</sub> 线路阻抗的 2 倍, 采用传统下垂和改进下垂控制时逆变器的输出有功、无功和 A 相电流波形分别如图 9(a)、(b)、(c)和图 10(a)、(b)、(c)所示。采用传统下垂控制时, 由于线路阻抗不同, 无功功率有明显的分配偏差,

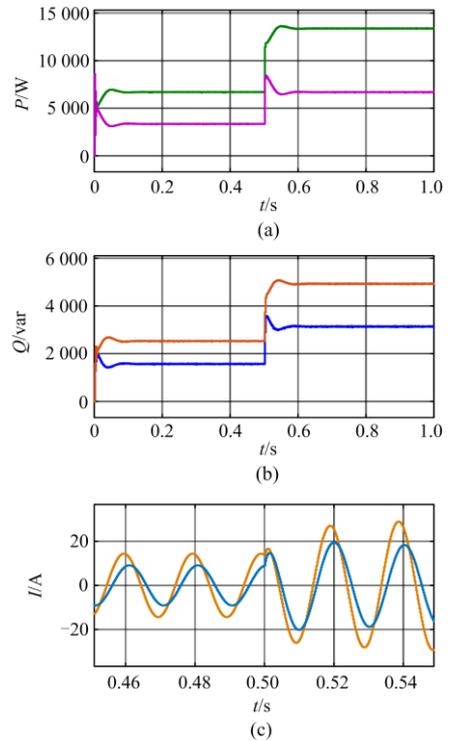


图 7 工况 2 下传统下垂控制仿真波形

Fig. 7 Simulation waveform of traditional droop control under working condition 2

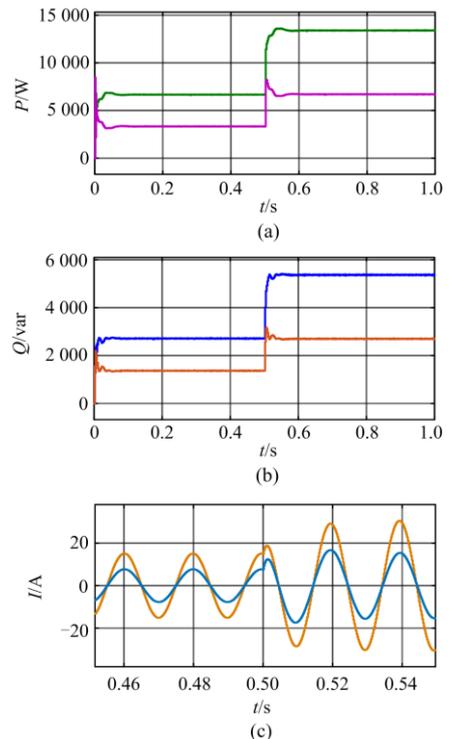


图 8 工况 2 下改进下垂控制仿真波形

Fig. 8 Improved droop control simulation waveform under working condition 2

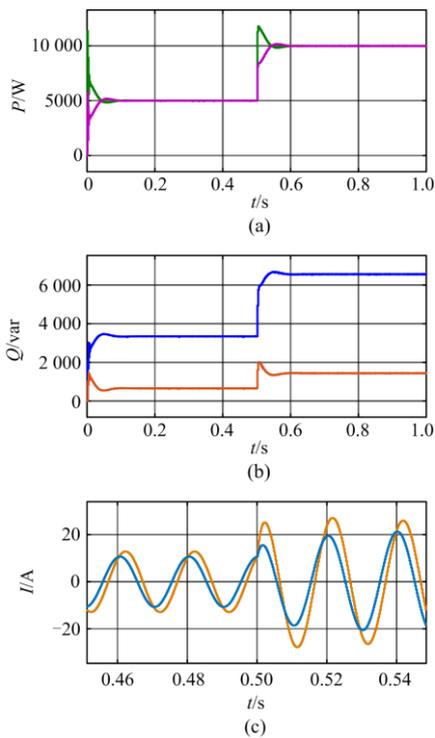


图9 工况3下传统下垂控制仿真波形

Fig. 9 Simulation waveform of traditional droop control under working condition 3

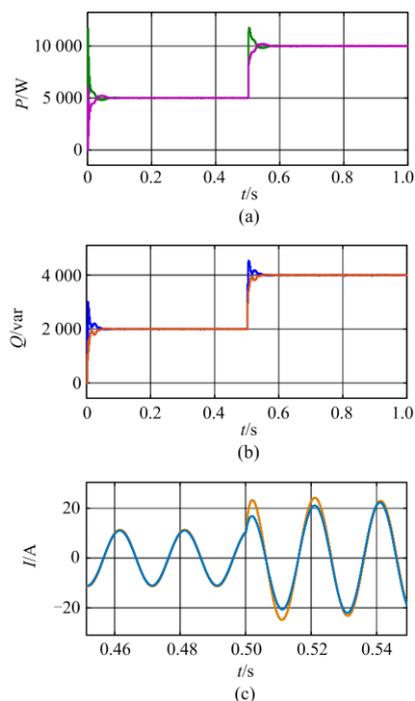


图10 工况3下改进下垂控制仿真波形

Fig. 10 Improved droop control simulation waveform under working condition 3

此时, 逆变器的输出差异导致系统出现环流, 可以看出, 逆变器输出电流有明显幅值和相位差异, 在采用改进下垂控制后, 逆变器输出无功值几乎重合, 电流偏差也逐渐减小, 在负载增加后, 系统也可以稳定运行。

工况4: 两并联DG容量不同、线路阻抗不同在这两种因素的共同影响下, 当采用传统下垂控制时, 如图11(a)、(b)、(c)所示, 无功功率无法按其容量成比例分配, 逆变器间有明显环流, 改进后的波形如图12(a)、(b)、(c)所示, 在这个过程中, 有功均可按其容量成比例分配, 无功分配和环流问题均有明显改善。

由以上仿真结果可知: 基于一致性算法的改进下垂控制策略, 可以有效地改善传统下垂控制因DG容量和线路阻抗不同, 造成的无功功率分配不合理以及环流问题, 并且能灵活应对负载突变, 具有较快的动态响应速度。

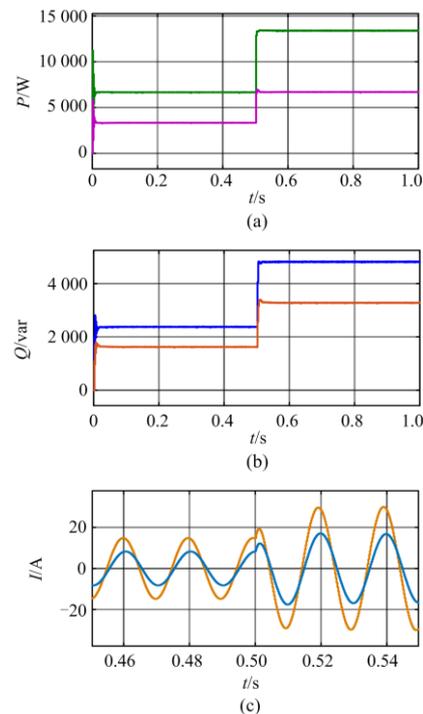
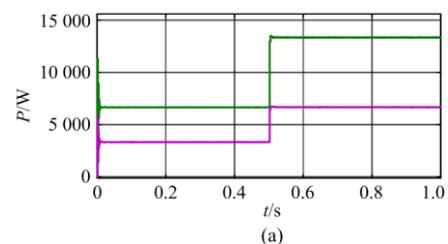


图11 工况4下传统下垂控制仿真波形

Fig. 11 Simulation waveforms of traditional droop control under working condition 4



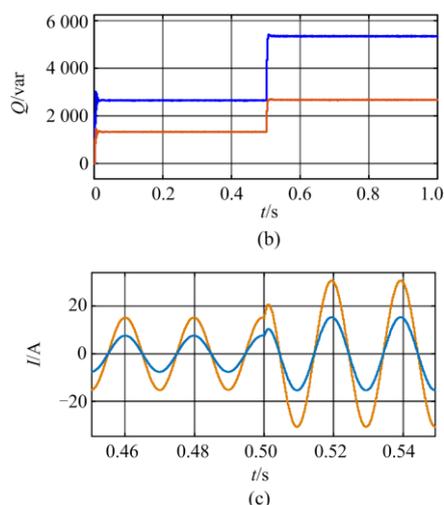


图 12 工况 4 下改进下垂控制仿真波形

Fig. 12 Improved droop control simulation waveform under working condition 4

## 4 结论

在微电网中,多逆变器并联的理想状态是功率按其容量比例均衡分配,并且无环流问题。本文针对微电网中传统下垂控制由于线路阻抗不匹配所引起的无功功率分配不精确的问题,提出一种基于一致性算法的新型下垂控制策略。利用局部通信获取其他 DG 输出的无功信息,根据自身的额定容量计算其参考无功与实际输出无功功率的差值,通过偏差的连续相加获取需要补偿的无功值,以达到功率均衡分配的效果。这种控制算法的引入,具有以下优越性:

- 1) 无需检测微电网结构和线路参数,消除线路阻抗不匹配所带来的影响,减小系统环流;
- 2) 可以应对不同容量的 DG,具有更好的灵活性;
- 3) 可以快速应对负载突变,具有良好的动态性能,提高了微电网运行的稳定性。

## 参考文献

[1] 王成山,李琰,彭克. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 12-20.  
WANG Chengshan, LI Yan, PENG Ke. Overview of typical control methods for grid-connected inverters of distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2012, 24(2): 12-20.

[2] FAN B, GUO S L, PENG J K, et al. A consensus-based algorithm for power sharing and voltage regulation in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,

2020, 26(6): 3987-3996.

[3] 陈昕,张昌华,黄琦,等. 引入微分项下垂控制的逆变器并联系统小信号稳定性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3467-3473.  
CHEN Xin, ZHANG Changhua, HUANG Qi, et al. Small-signal stability analysis of parallel inverter system with power differential term droop control power system technology[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3467-3473.

[4] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Distributed secondary control for islanded microgrids-a novel approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 1018-1031.

[5] 焦皎,孟润泉,任春光,等. 交直流微电网 AC/DC 双向功率变换器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 84-93.  
JIAO Jiao, MENG Runquan, REN Chunguang, et al. Bidirectional AC/DC interlinking converter control strategy for an AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 84-93.

[6] LIU X, WANG P, LOH P C. A hybrid AC/DC microgrid and its coordination control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 278-286.

[7] 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.

[8] 刘忠,杨陈,蒋玮,等. 基于一致性算法的直流微电网储能系统功率分配技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 61-69.  
LIU Zhong, YANG Chen, JIANG Wei, et al. Consensus algorithm based power distribution technology for energy storage system in DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 61-69.

[9] KHAZAEI J, MIAO Z. Consensus control for energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3009-3017.

[10] 吕志鹏,苏剑,李蕊,等. 不同功率等级微源逆变器并联控制新方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 191-198.  
LÜ Zhipeng, SU Jian, LI Rui, et al. New power control strategy on paralleled micro-source inverters with different power levels[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(7): 191-198.

[11] 杜田雨,付子义,任磊. 不平衡电网下逆变器功率波动/电流质量协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 141-150.  
DU Tianyu, FU Ziyi, REN Lei. Coordinate control of

- power fluctuation and current quality for inverter under unbalanced voltage conditions[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(5): 141-150.
- [12] HAIDER S, LI Guojie, WANG Keyou. A dual control strategy for power sharing improvement in islanded mode of AC microgrid[J]. *Protection and Control of Modern Power System*, 2018, 3(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-018-0084-2.
- [13] 闫俊丽, 彭春华, 陈臣. 基于动态虚拟阻抗的低压微电网下垂控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(21): 1-6.  
YAN Junli, PENG Chunhua, CHEN Chen. Droop control strategy based on dynamic virtual impedance in low-voltage microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(21): 1-6.
- [14] 马文涛, 王金梅, 王永奇. 虚拟阻抗对不同功率等级逆变器并联系统的稳定性分析[J/OL]. *中国电力*: 1-8[2021-06-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200716.1717.008.html>.  
MA Wentao, WANG Jinmei, WANG Yongqi. Analysis of the influence of virtual impedance on the stability of parallel voltage inverters with different voltage levels[J/OL]. *Electric Power*, 1-8[2021-06-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200716.1717.008.html>.
- [15] GUO F H, WEN C Y, Wen, MAO J F, et al. Distributed secondary voltage and frequency restoration control of droop-controlled inverter based microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(7): 4355-4364.
- [16] 颜湘武, 王星海, 王月茹. 微电网的新型无差调频控制方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(21): 1-6.  
YAN Xiangwu, WANG Xinghai, WANG Yueru. Research on novel zero-error frequency regulation control method for microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(21): 1-6.
- [17] 王岳, 杨国华, 庄家懿, 等. 基于一致性算法的微电网无差调频控制策略[J]. *中国电力*, 2020, 53(10): 187-191.  
WANG Yue, YANG Guohua, ZHUANG Jiayi, et al. Zero-error frequency regulation control method for microgrids based on consensus algorithm[J]. *Electric Power*, 2020, 53(10): 187-191.
- [18] 张平, 石健将, 李荣贵, 等. 低压微网逆变器的“虚拟负阻抗”控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(12): 1844-1852.  
ZHANG Ping, SHI Jianjiang, LI Ronggui, et al. A control strategy of 'virtual negative' impedance for inverters in low-voltage microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(12): 1844-1852.
- [19] ROCABERT J, LUNA A, BLAABJERG F, et al. Control of power converters in ac microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(11): 4734-4749.
- [20] 吕志鹏, 盛万兴, 蒋雯倩, 等. 具备电压稳定和环流抑制能力的分频下垂控制器[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(36): 1-9.  
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, JIANG Wenqian, et al. Frequency dividing droop controllers with the function of voltage stabilization and circulation control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(36): 1-9.
- [21] 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): 72-85.  
ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(1): 72-85.
- [22] TAO Y, LIU Q W, DENG Y, et al. Analysis and mitigation of inverter output impedance impacts for distributed energy resource interface[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 30(7): 3563-3576.
- [23] 李欣煜, 周建萍, 李泓青, 等. 基于粒子群算法的微电网实时功率均分的改进下垂控制策略[J]. *高电压技术*, 2018, 44(10): 3425-3432.  
LI Xinyu, ZHOU Jianping, LI Hongqing, et al. Improved droop control strategy for real-time power sharing of microgrid based on particle swarm optimization[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(10): 3425-3432.
- [24] 吕志鹏, 吴鸣, 黄红, 等. 一种具有网络自适应能力的分布式电源改进下垂控制策略[J]. *电网技术*, 2018, 42(9): 2948-2957.  
LÜ Zhipeng, WU Ming, HUANG Hong, et al. An improved droop control with network self-adaptability for distributed generation[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(9): 2948-2957.
- [25] 白小丹, 苗虹, 曾成碧, 等. 适用于低压微网中逆变器无功均分的改进下垂控制策略[J]. *高电压技术*, 2020, 46(4): 1310-1318.  
BAI Xiaodan, MIAO Hong, ZENG Chengbi, et al. Improved droop control strategy for reactive power sharing of inverters in low-voltage microgrids[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(4): 1310-1318.

收稿日期: 2020-09-25; 修回日期: 2020-11-14

作者简介:

张莹(1992—), 女, 硕士, 研究方向为电力电子控制技术; E-mail: 729060301@qq.com

孟润泉(1968—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用研究。E-mail: mengrunquan@126.com

(编辑 魏小丽)