**基于下垂控制逆变器并联运行的**

**改进策略**

戴旺，陈思宇，袁威

（南京工程学院电力工程学院,江苏 南京 210067）

**摘要：**针对逆变器并联系统运行时因线路阻抗不同而产生的环流问题以及为实现功率均分，提出了一种改进的逆变器并联控制方法。利用逆变器输出端电压和并联节点处的电压推导出改进的功率计算方程，提高了逆变器并联运行均流控制器的控制精度；针对逆变器并联运行不同电压等级连接线路阻抗不同引起的无功环流，设计了线路压降补偿环节，从而改进了逆变器并联系统的功率均分性能；在传统的下垂控制方法中加入了积分环节和微分环节，提高了系统的动态性能，消除静态误差。

**关键词：**逆变器；下垂控制；线路阻抗；无功环流

0引言

微电网系统中的逆变器并联运行能够提高微电网系统的可靠性和扩大电源容量。相比于单台逆变器，多台较小容量的逆变器并联可以降低运行成本，提高灵活性和电力系统的可靠性，还可以根据需求来获得不同的容量。逆变器的并联运行被广泛运用于分布式发电系统。逆变器的并联运行的目的是实现负载的功率能够在逆变器之间实现均分，这是通过调节逆变器输出电压幅值和相位来实现的。

逆变器的并联控制技术主要有三：下垂控制法，有功及无功功率调节法和瞬态电流控制法[1]。随着微电网中并联的逆变器的数量的增加，逆变器之间的信号线变得越来越复杂。然而，传统的逆变器下垂控制方法以线路电阻远小于电抗为前提，没有考虑到逆变器线路阻抗不同的情况。并且，传统的逆变器下垂控制方法的基本控制方程是以逆变器所并联的公共节点PCC（point of common coupling）的电压为基准电压，但微电网系统中各微电源相距较远，导致反馈信号不能测到PCC处的电压，因此系统中的均流控制器不能准确地实现下垂控制算法。

本文首先分析了传统下垂控制方法的原理及其不足之处，然后推导逆变器输出电压的有功功率和无功功率的计算方程。为了使逆变器在不同线路阻抗上实现功率均分和无功功率环流的抑制并提高系统的响应速度，本文提出了一种改进的逆变器并联下垂控制算法。

1. 下垂控制原理的分析
   1. 逆变器并联系统环流分析



图 1 微电网孤岛运行时的实际拓扑

为方便分析，微电网中各台分布式电源逆变器输出的交流电压可以等效成可控电压源，如图2所示，为两个分布式电源逆变器并联的等效电路。其中，分别表示逆变器1、2输出电阻和线路电阻之和；分别表示逆变器1、2输出电抗和线路电抗之和；表示等效负载；表示微电网系统中交流母线电压；分别表示逆变器1、2的输出空载电压；分别表示逆变器1、2输出空载电压和微电网交流母线电压的相位差。



图 2 两台逆变器并联等效电路

由图 2，得到两逆变器的输出电流为：

 （1）

其中，n=1，2；表示逆变器n空载时的输出电压的幅值；表示逆变器n空载时输出电压与微电网交流母线电压的相位差；表示逆变器n输出阻抗和线路阻抗之和。

环流定义为：

 （2）

由上式可见，影响逆变器并联系统中环流大小的因素有：逆变器输出的等效阻抗、输出电压幅值和相角。在实际情况下，线路电阻都很小，即使输出电压有一点差异，那么两个逆变器间就会产生很大的环流，故必须抑制环流，一方面可以加入电感来降低环流，但加入的电感使得系统的稳定性变差；另一方面可以加入反馈环节，保证电压无变化，从而减小环流。

* 1. 逆变器并联运行系统功率分析

为分析输出功率特性，本文采用相量法，逆变器并联等效模型如图3所示。



图 3 逆变器并联等效模型

其中，分别表示逆变器1和2的输出电压，分别表示逆变器1和2的输出电压相位，为负载端电压，为了便于分析，本文设：

 （3）

由基尔霍夫电压电流定律可以得到：

 （4）

又知道逆变器1输出的复功率，则：

 （5）

又，得到逆变器1的有功功率和无功功率：

 （6）

在并联系统正常工作的情况下，必须保证各逆变器输出电压与并联母线的电压相位差即的差值很小，由正余弦运算法则，可以近似得到：

 （7）

将式（7）带入式（6），可得到：

 （8）

同理，逆变器2的有功功率和无功功率为：

 （9）

通过对传统下垂法进行分析可知，不同电压等级的电网线路有不同的阻抗比，如表1所示[2]。在低压线路中，电阻在阻抗中占很大的比例，也就是说阻抗比相对中高压线路较高。在微电网中每台逆变器的线路存在差异，导致各逆变器输出电压幅值不等，则无功环流很大。为解决逆变器连接线路阻抗不同的情况，需要采取一定的措施对传统下垂控制方法进行改进。

表1 不同电压等级的电网线路阻抗比

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 类型 | 电阻/（） | 电感/（） | 阻抗比 |
| 低压线路 | 0.642 | 0.083 | 7.70 |
| 中压线路 | 0.161 | 0.190 | 0.85 |
| 高压线路 | 0.060 | 0.191 | 0.31 |

1. 改进下垂控制原理
   1. 改进功率的计算

若n台DG逆变器并联运行，根据KVL和KCL可得：

 （10）

由式（10）可得负载端电压的向量表达式为：

 （11）

可得到第n台逆变器输出电流的向量表达式为：

 （12）

由视在功率计算公式得，第n台逆变器输出视在功率表达式为：



（13）

由式（13）得，改进后的逆变器输出功率只与逆变器端电压有关，这样就克服了采集并联PCC处电压的困难[3]。

* 1. 改进下垂控制方法

当微电网系统孤岛运行时，连接线路的阻抗不等，导致连接线路的压降不等，负载的无功功率不能均分，使得线路产生无功环流。为抑制无功环流，设计了线路压降补偿环节，使逆变器输出电压升高来抵消连接线路压降，从而实现不同电压等级连接线路末端电压相等，从而抑制无功环流。如图4所示，为线路压降补偿环节。



图 4改进下垂控制方法线路压降补偿环节

图4中，为逆变器输出电压的幅值；为逆变器经过线路压降补偿环节后的输出电压的幅值。

线路压降补偿环节有效地抑制了线路阻抗不等引起的无功环流，实现负载无功功率理想均分。为提高微电网系统中逆变器并联控制系统的动态性能，本文引入积分环节和微分环节。积分环节是为了实现指令频率和指令电压无差控制，这样就可以使得系统有功功率和无功功率获得较优的分配效果。微分环节可以提高逆变器并联控制系统动态响应的速度，并且可以过滤大量的干扰信号。根据上述结论，本文提出改进的下垂控制方法，其方程为：

 （14）

 （15）

 （16）

式中，分别为有功功率积分系数和无功功率积分系数；分别为有功功率微分系数和无功功率微分系数。

图 5 改进下垂控制方法结构图

图5为改进下垂控制方法结构图，其中，为低通滤波器的截至频率，为下垂控制环节输出电压。



图 6单台逆变器双闭环控制结构图

图6 为单台逆变器双闭环控制结构图[4]，其中，为LC滤波后的电流，为脉冲调制解调环节调整信号。

3结语

本文首先分析了传统下垂控制方法的原理及其不足之处，然后推导逆变器输出电压的有功功率和无功功率的计算方程。为抑制无功环流，设计了线路压降补偿环节，抑制无功环流，使得逆变器并联系统具有良好的均流性能。为消除减小采用低通滤波器计算功率时对并联系统动态响应的影响，本文在传统下垂控制方法中引入积分环节和微分环节。

参考文献:

1. 孙丽. 微网分布式电源逆变器的并联控制策略研究[D].陕西科技大学,2018.

[2]周奇勋,张红,曹世宏,黎文权,曹浩翔,李萌.基于改进下垂法的微电网逆变器并联控制技术[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(08):25-31.

[3]周奇勋,张红,曹世宏,黎文权,曹浩翔,李萌.基于改进下垂法的微电网逆变器并联控制技术[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(08):25-31.

[4]李建霖,唐欣,陈胜.电流外环电压内环无缝切换控制策略[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(07):7-11.

**Improved strategy for parallel operation of droop control inverters**

**DAI Wang, CHEN Si-yu, YUAN Wei**

**(School of Electric power Engineering, Nanjing Institude of Technology, Nanjing 210067, China)**

**Abstract:** in order to solve the problem of circulating current caused by different line impedances and to realize power sharing, an improved parallel control method of inverter is proposed. By using the improved power calculation equation derived from the output voltage of the inverter and the voltage at the parallel node, the control accuracy of the current sharing controller of the inverter parallel operation is improved; according to the reactive circulation caused by the different line impedance of different voltage levels of the inverter parallel operation, the line voltage drop compensation link is designed, so as to improve the power sharing performance of the inverter parallel system; In the traditional droop control method, the integral part and differential part are added to improve the dynamic performance of the system and eliminate the static error.

**Key words:** inverter; droop control; line impedance; reactive circulation