

# 一种新型逆变电源并联下垂控制方法

单 峡

(金陵科技学院信息技术学院,江苏 南京 210001)

**摘 要:**一种基于下垂方法的不需要各单元之间控制连线的新型逆变器并联控制器,其控制算法使每个逆变器输出电压的幅值和相位分别随着其输出功率的无功分量和有功分量的增大而减小。与传统下垂方法不同,在下垂曲线的设置上使下垂斜率随着输出功率的增大而增大,保证了逆变器能在各种功率条件下都能有很好的均流效果。通过在 Matlab 上的仿真和试验验证,证明了这种方法的正确性。

**关键词:**并联;逆变器;下垂

**中图分类号:**TM 464

**文献标识码:**B

**文章编号:**1672-755X(2006)03-0062-06

## A New Droop Controller for Parallel Operation of Inverters

SHAN Xia

(Jinling Institute of Technology, Nanjing 210001, China)

**Abstract:** In this paper, a novel controller for parallel operation of inverters without control inter-connection based on the droop method is presented. In the droop method, the voltage amplitude and phase of each inverter will be decreased when its reactive power and active power increase. As opposed to the conventional droop method, the new method will enhance the droop parameters when the output power increase, which makes the inverter run well in parallel connection of various power condition. This method is proved to be valid from the simulation in Matlab and experimental results.

**Key words:** parallel operation; inverter; droop

在许多重要设备的使用中,都需要使用大容量和高稳定性的逆变电源。而提高逆变电源的容量和稳定性最好的办法就是,多台逆变器并联使用<sup>[1]</sup>。然而逆变器并联是交流量的并联,要求各个电源的输出电压在幅值、频率和相位上都保持一致。由于逆变器的输出阻抗非常小,一旦输出电压不能保持一致,将会在各个单元之间产生环流,最终会烧毁器件,导致供电中断。所以逆变器并联控制的主要任务,就是抑制环流并使负载电流在各个电源之间平均分配。为此,本文采用来源于电力系统理论的下垂方法<sup>[2]</sup>,根据逆变器输出有功功率( $P$ )和无功功

率( $Q$ )的变化,改变逆变器的给定信号的相角和幅值,实现各单元输出有功功率和无功功率的平均分配,达到均流的目的。这种方法的主要优点就是每个单元只需要采集自己的输出电流和电压,达到控制目的,避免了不同逆变单元之间的通讯,各个单元之间唯一相连的就是他们的输出线。

在传统的下垂控制器中,电压的幅值和相位是随着输出功率的无功分量和有功分量的增大按照固定斜率下降的。但是这种方法只能在一定功率范围内适用,当输出功率有较大范围的变动时,就需要改变下垂斜率才能满足并联运行的要求<sup>[3]</sup>。

收稿日期:2006-04-10

作者简介:单峡(1977-),女,江苏滨海人,助工,硕士研究生,研究方向:物理电子学。

一种新型的下垂控制器,是把下垂斜率与输出功率相联系,使其随着功率的增加而增大。通过在Matlab上的仿真和试验结果,与传统的下垂方法相比较,证明了这用方法在各种功率条件下都能获得很好的性能。

### 1 系统建模和分析

图1所示就是两个逆变器并联的等效电路,UPS<sub>1</sub>和UPS<sub>2</sub>代表两个逆变电源,Z<sub>1</sub>和Z<sub>2</sub>分别是他们的输出阻抗,而Z<sub>L</sub>是负载阻抗。

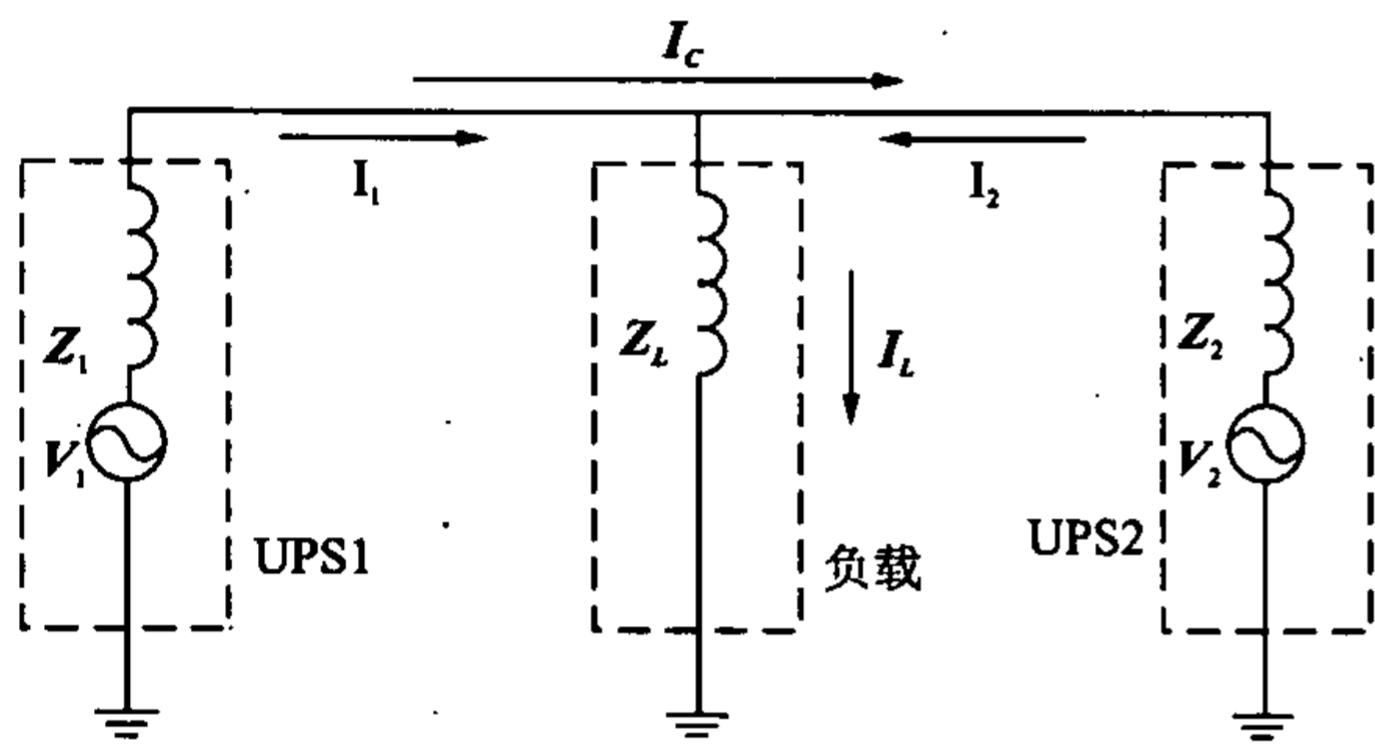


图1 两个逆变器并联的等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of two parallel connected inverters

在实际情况下,两个电源的输出电压V<sub>1</sub>和V<sub>2</sub>在幅值和相位上一定会有差别,假设V<sub>1</sub>的表达式为:

$$V_1 = E_1 \cdot \cos\varphi_1 = E \angle \varphi \quad (1)$$

V<sub>2</sub>与V<sub>1</sub>幅值差为ΔE,相位差为θ,于是可得V<sub>2</sub>的表达式:

$$V_2 = E_2 \cdot \cos\varphi_2 = (E + \Delta E) \angle (\varphi + \theta) \quad (2)$$

于是得到环流表达式:

$$I_c = \frac{V_1 - V_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{E \angle \varphi - (E + \Delta E) \angle (\varphi + \theta)}{(r_1 + r_2) + j(L_1 + L_2)} \quad (3)$$

由于逆变器的输出阻抗主要呈感性,即r<sub>1</sub>+r<sub>2</sub>≪Z<sub>1</sub>+Z<sub>2</sub>,所以(3)式可以简化为:

$$I_c = \frac{E \angle \varphi - (E + \Delta E) \angle (\varphi + \theta)}{j(L_1 + L_2)} \quad (4)$$

由(4)式可以看出,环流与逆变器的输出感抗成反比,相位上比两个逆变器输出电压的差滞后90°。下面分从幅值差和相位差两个方面来分析由其产生的环流。

当两个逆变器输出电压相位一致,幅值不同时,即(4)式中θ=0,环流的表达式如(5)式所示。假设V<sub>1</sub>的方向与实轴方向一致,并联系统的电压及环流向量如图2所示,环流与输出电压有90°的相差,因此其将会产生额外的无功功率,加大系统负担。

$$I_c = \frac{\Delta E \angle \varphi}{j(L_1 + L_2)} \quad (5)$$

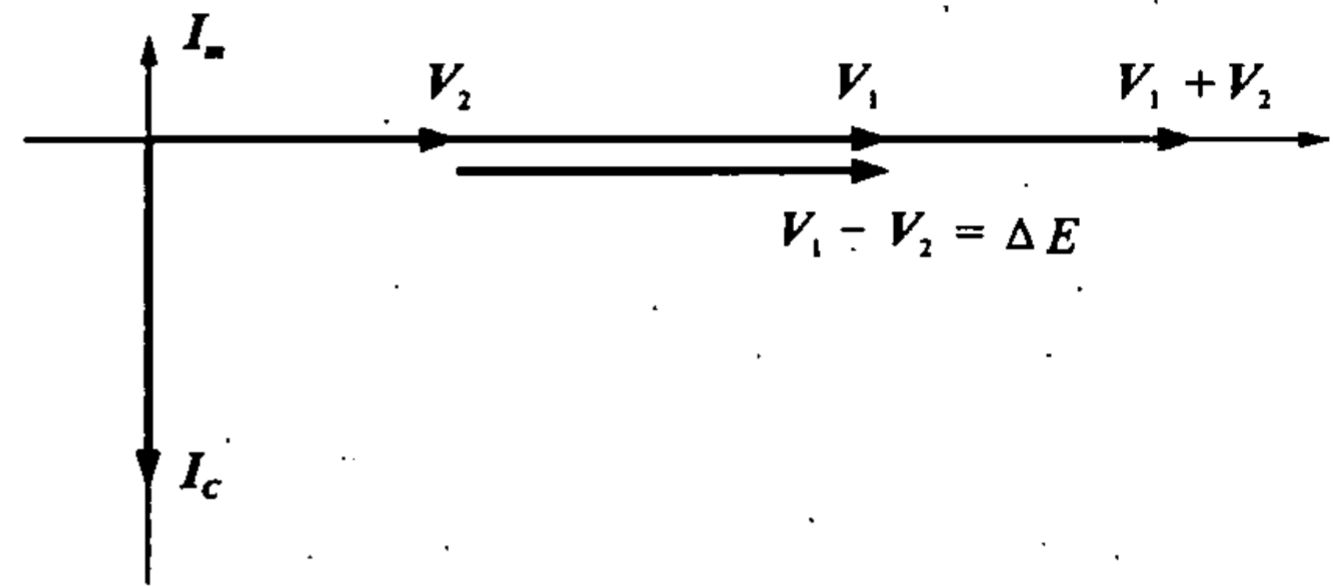


图2 幅值差产生的环流向量

Fig.2 Vector chart of cross current caused by amplitude error

当两个逆变器幅值相同,而相位不一致时,即(4)式中ΔE=0,环流的表达式如(6)式所示。假设V<sub>1</sub>的方向与实轴方向一致,此时并联系统的电压及环流向量如图3所示,环流向量的方向与输出电压和的方向一致,其产生的额外功率是则是有功功率,对系统的影响更大。

$$I_c = \frac{E}{j(L_1 + L_2)} [1 \angle \varphi - 1 \angle (\varphi + \theta)] \quad (6)$$

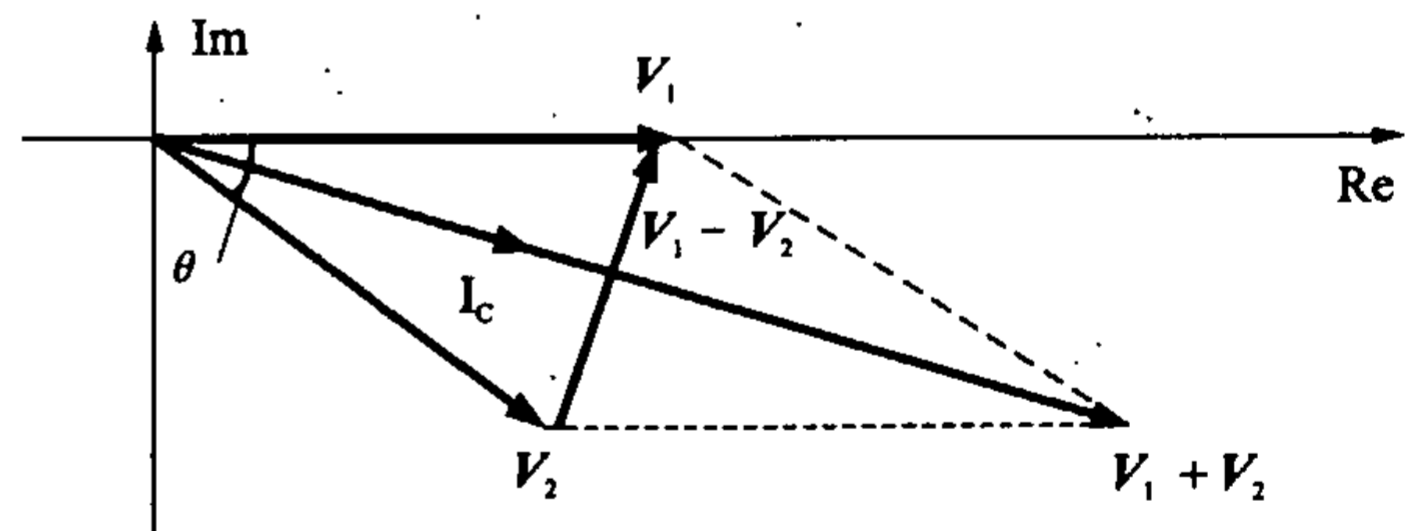


图3 相位差产生的环流向量

Fig.3 Vector chart of cross current caused by phase error

基于以上分析,可知输出电压的幅值差将产生无功环流,而相位差则产生有功环流,因此可以通过控制电压幅值和相位来分别控制无功功率和有功功率,从而达到均流的目的。方程(7)是传统下垂方法的基本方程,这种方法的实质就是根据输出功率调整逆变器的输出阻抗,达到均流的目的。

$$\begin{cases} E = E_0 - m \cdot Q \\ \theta = \theta_0 - n \cdot P \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $E_0$  为逆变器空载情况下的输出电压幅值;

$\theta_0$  为逆变器空载情况下的输出电压相位;

$m$ : 幅值的下垂系数

$n$ : 相位的下垂系数

为了使各逆变模块能够根据其额定功率均分电流, 幅值和相位下垂系数要满足式(8)、(9):

$$m_1 \cdot S_1 = m_2 \cdot S_2 = \dots = m_k \cdot S_k \quad (8)$$

$$n_1 \cdot S_1 = n_2 \cdot S_2 = \dots = n_k \cdot S_k \quad (9)$$

其中  $S_1, S_2, \dots, S_k$  是各逆变器的视在功率, 如果各模块的额定视在功率相同, 则设定他们具有相同的合适的幅值和相位下垂系数, 就可使他们均分负载的无功和有功电流。

图4所示, 就是下垂控制原理图, 每个逆变器只需要知道自身的输出电压和电流, 计算出无功功率和有功功率, 通过下垂方程(7)计算出新的电压幅值和相位, 进而计算出当前的参考电压正弦值, 做为逆变器控制系统的正弦给定信号, 就可以实现并联的均流控制了<sup>[4]</sup>。

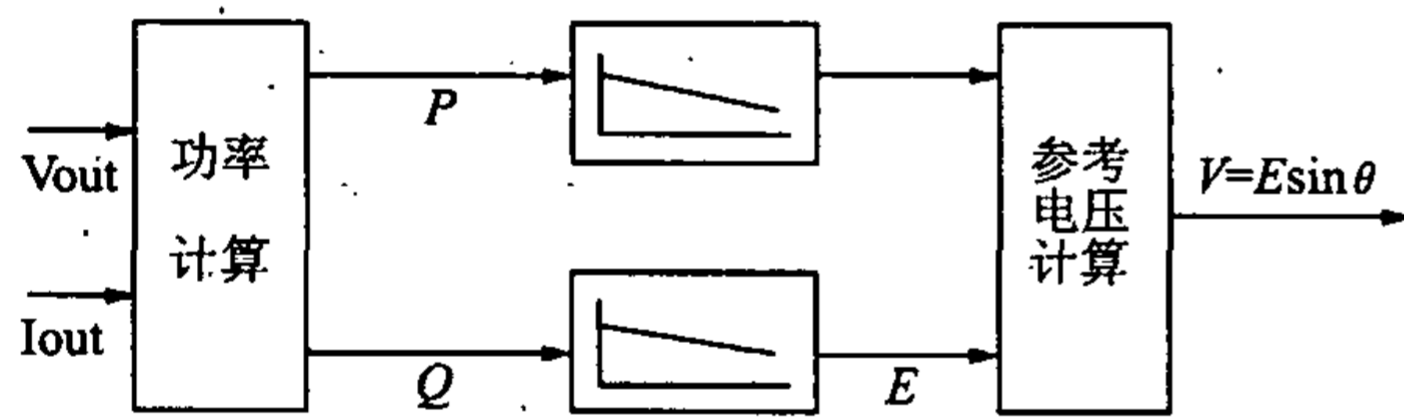


图4 并联下垂控制原理

Fig.4 Principle chart of droop control of parallel system

但是下垂方法有一个固有缺陷: 输出电压的幅值和相位会受到并联控制的影响, 且随着输出功率的变化而发生变化。一方面, 幅值和相位下垂系数  $m, n$  的值在很大程度上影响电压的稳定度(幅值和相位的变化), 另一方面, 并联均流效果的好坏也主要取决于  $m, n$  的选择。所以  $m, n$  的选择就应该在并联均流效果和输出电压稳定度之间取一个折中。假设某系统的幅值稳定裕度和相角稳定裕度分别为  $\delta E$  和  $\delta \Phi$ , 系统的额定输出视在功率为  $S$ , 那么  $m, n$  必须满足下式:

$$m \leq \frac{\delta E}{S} \quad (10)$$

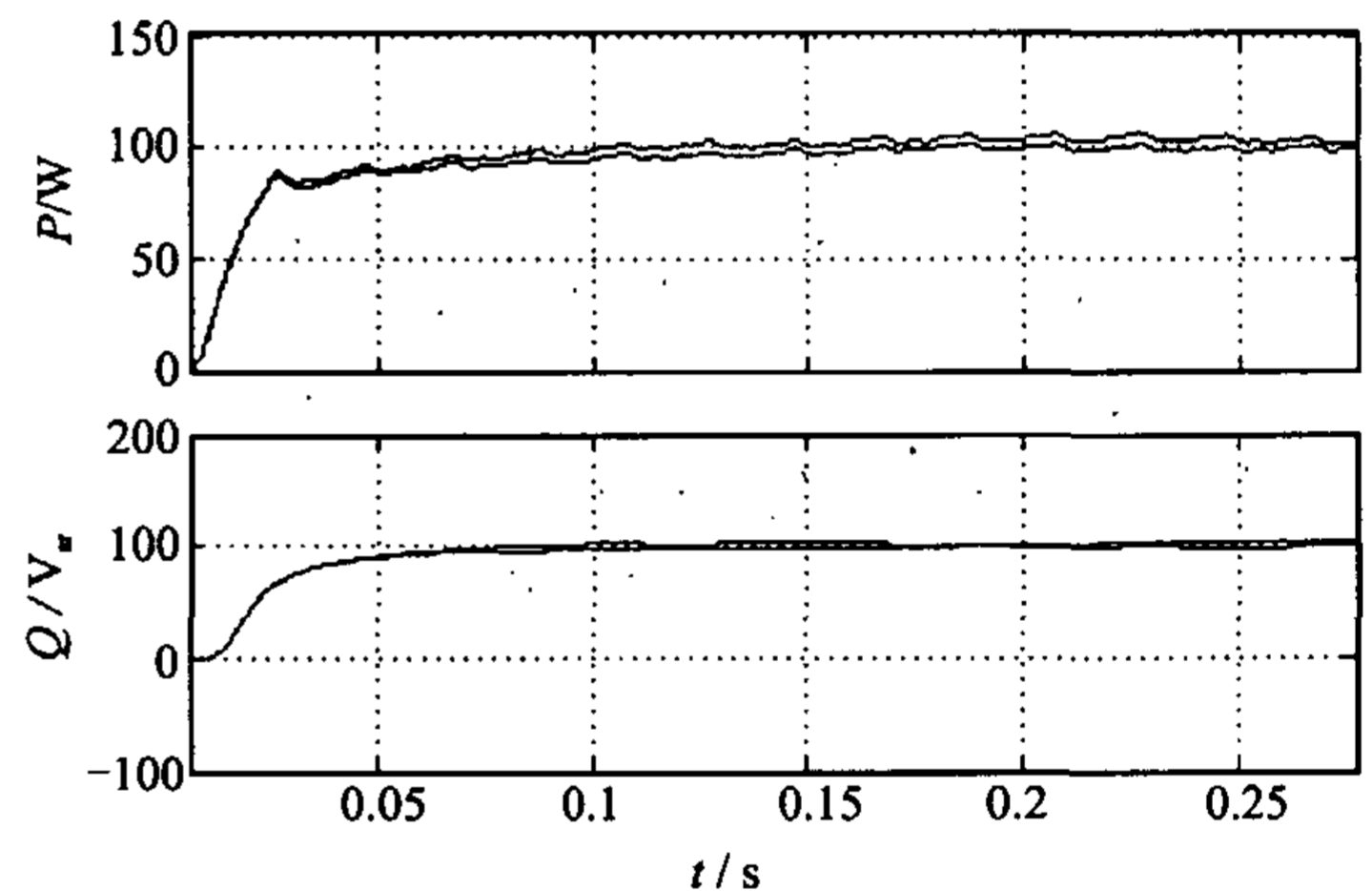
$$n \leq \frac{\delta \Phi}{S} \quad (11)$$

在以前的文献中,  $m, n$  的值会在满足式

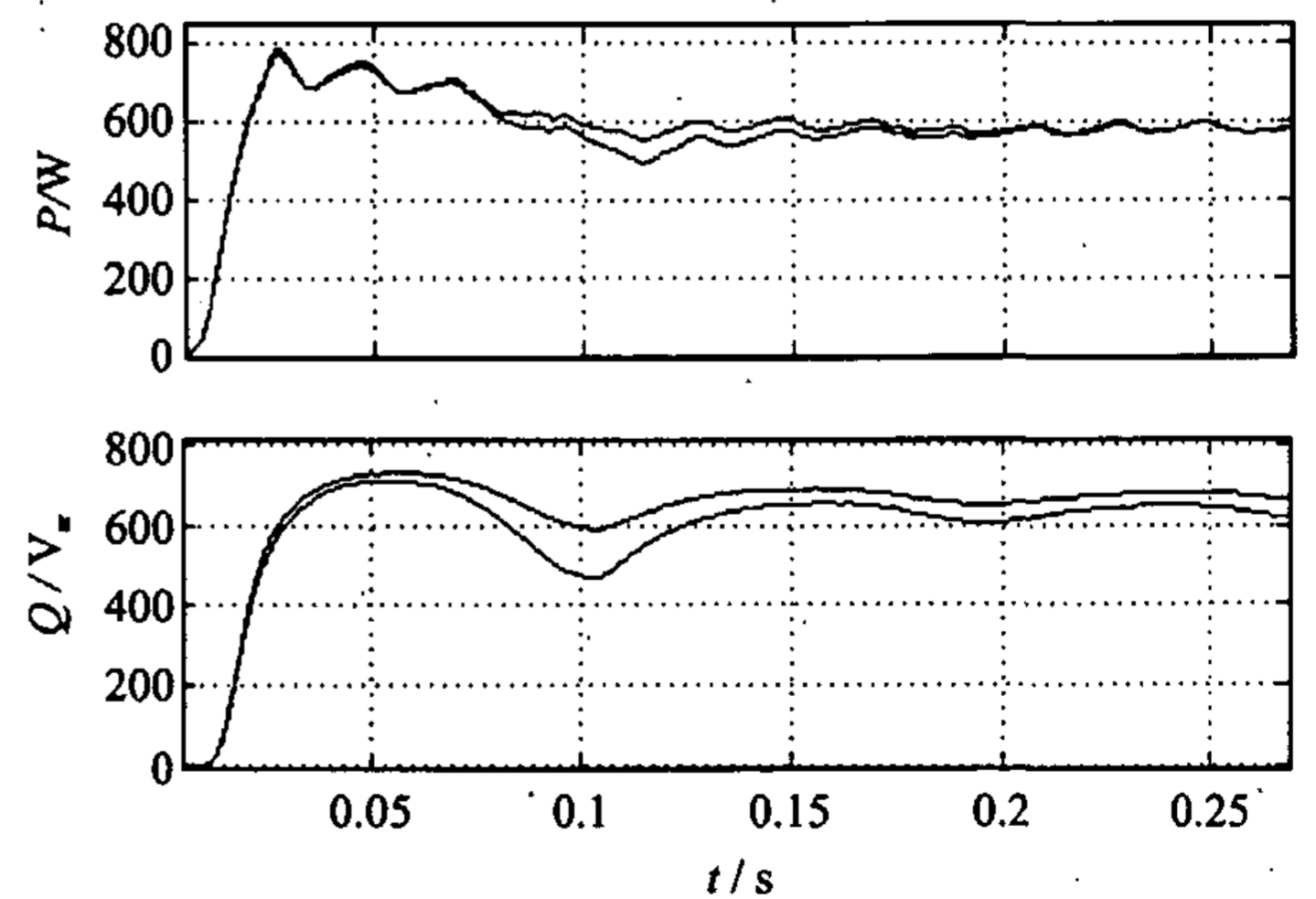
(10)、(11)的条件下, 根据仿真或试验结果选择为某一固定值。但是由于电压幅值和相角的下垂是和输出功率密切相关的, 这样做能够在一定的负载条件下满足均流的要求, 但随着输出功率的改变, 均流效果和电压稳定度将随着发生变化, 尤其是这对于那些负载情况频繁发生变化的电源的性能会有更大的影响。为此, 本文提出一种  $m, n$  是非固定值的新型下垂控制方法。

## 2 新型下垂控制方法

由下垂方程(7)可知, 下垂系数越小并联控制对电压稳定度的影响越小, 所以在系数的选择上应该力求做到用最小的下垂系数达到要求的均流效果。而在一定的幅值稳定裕度和相角稳定裕度的要求下, 系统的输出功率与下垂系数的关系可以由以下的仿真结果得到。图5、图6是在 Matlab 中,

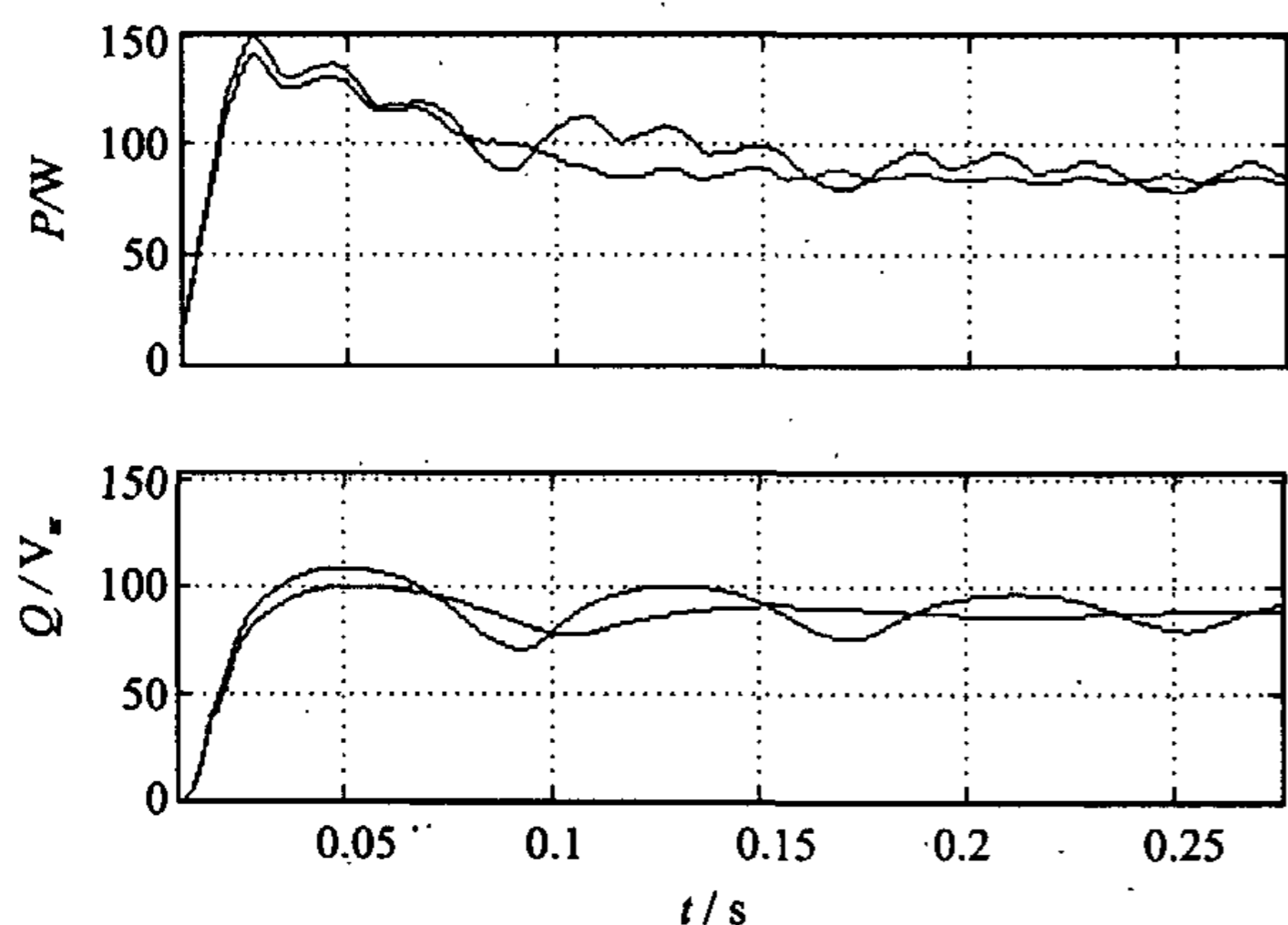


(a) 输出功率: 有功功率 100 W, 无功功率 100 Var  
(a) Output power: active power 100 W, reactive power 100 Var

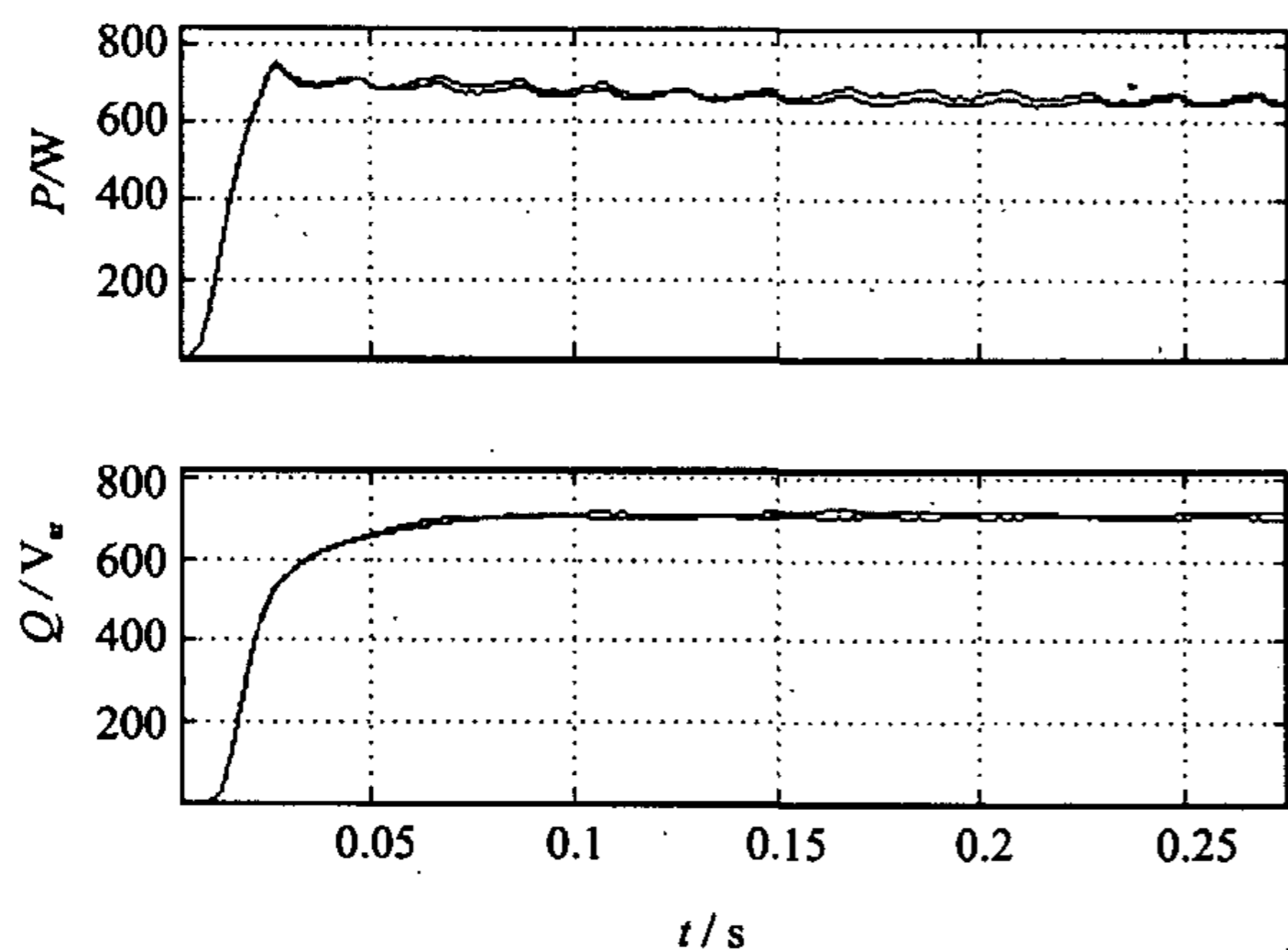


(b) 输出功率: 有功功率 700 W, 无功功率 700 Var  
(b) Output: active power 700 W, reactive power 700 Var

图5 并联输出功率比较 ( $m = 0.0004, n = 0.00004$ )  
Fig.5 Comparison of output power of parallel system



(a) 输出功率:有功功率 100 W,无功功率 100 Var  
(a) Output power: active power 100 W, reactive power 100 Var



(b) 输出功率:有功功率 700 W,无功功率 700 Var  
(b) Output power: active power 700 W, reactive power 700 Var

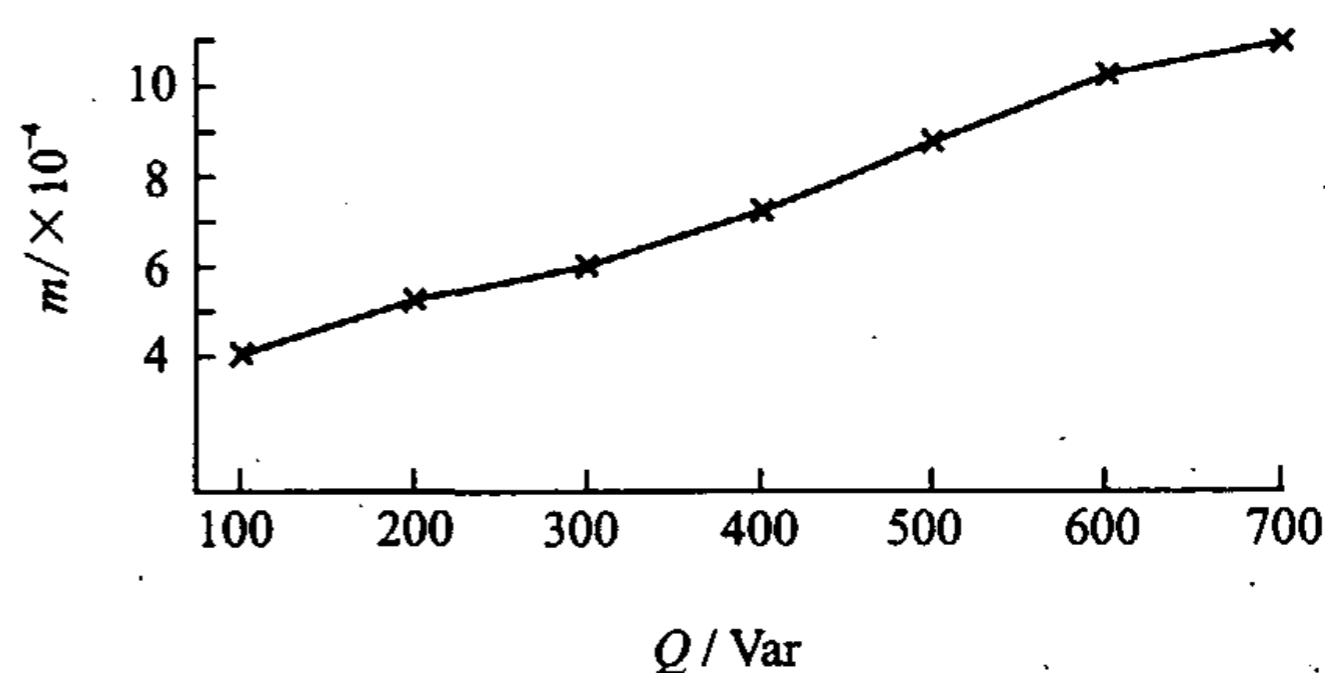
图 6 并联输出功率比较 ( $m = 0.0011, n = 0.00011$ )  
Fig.6 Comparison of output power of parallel system

两个由双闭环控制的单相逆变器并联的仿真结果。

如图 5(a) 所示,选择小参数在小功率下效果较好,但当功率提高以后,功率的均分效果就变差了,如图 5(b) 所示。如果加大下垂斜率,如图 6(b) 所示,在大功率条件下能够得到更好的并联控制效果。但这一组参数在较小的功率条件下,由于斜率过大,就容易产生过调节,使系统产生震荡,如图 6(a) 所示。仿真结果表明对应于不同的输出功率需要有不同的最佳下垂参数。

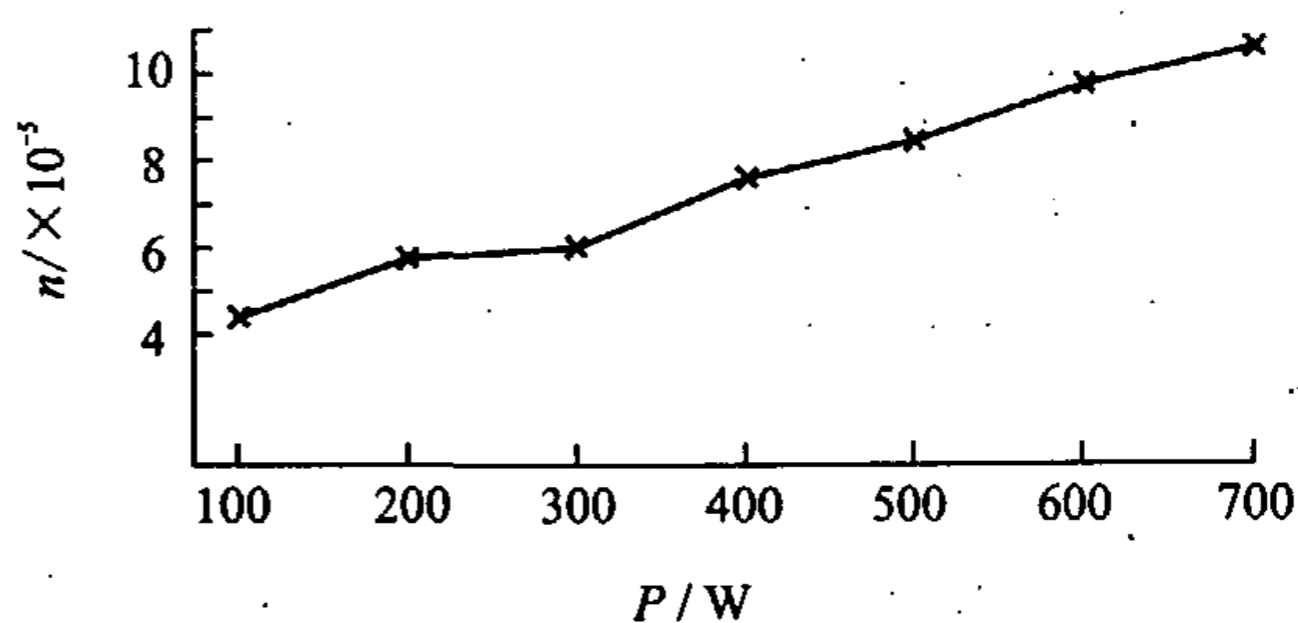
为了得到不同功率条件下的最佳下垂系数,本文通过进一步仿真,在不同功率下,测得最佳的下垂系数,得到最佳下垂系数分布图,如图 7 所示:

分析图 7 可以发现最佳的下垂系数与输出功率有一个类似于线性的关系,依据此关系本文提出



(a)  $m$  最佳值与无功功率的关系

(a) The relationship between best value of  $m$  and reactive power



(b)  $n$  最佳值与有功功率的关系

(b) The relationship between best value of  $n$  and reactive power

图 7 不同功率下最佳下垂系数分布图

Fig.7 Sketch map of best droop parameter under different power

了一种新的下垂方程,如式(12)所示:

$$\begin{cases} E = E_o - (m + m' \cdot Q) \cdot Q \\ \theta = \theta_o - (n + n' \cdot P) \cdot P \end{cases} \quad (12)$$

新方程用输出功率的一次函数来代替传统方程中固定的下垂参数,当输出功率发生变化时,参数也会随之往同一方向做相应的调整,使新的方法能在更宽的功率范围内达到很好的并联效果。这时为了使各逆变模块能够根据其额定功率均分电流,幅值和相位下垂系数要满足式(13)、(14):

$$m_1 \cdot S_1 + m_1' \cdot S_1^2 = m_2 \cdot S_2 + m_2' \cdot S_2^2 = \dots = m_k \cdot S_k + m_k' \cdot S_k^2 \quad (13)$$

$$n_1 \cdot S_1 + n_1' \cdot S_1^2 = n_2 \cdot S_2 + n_2' \cdot S_2^2 = \dots = n_k \cdot S_k + n_k' \cdot S_k^2 \quad (14)$$

如果各模块的额定视在功率相同,则设定他们具有相同的合适的  $m, m', n, n'$  这四个下垂系数,就可使他们均分负载的无功和有功电流。

同样此时的参数选择,也需要注意系统对电压幅值稳定裕度和相角稳定裕度的要求,而约束条件

(10)、(11)在新方法中就变成下式(15)、(16):

$$m + m' \cdot S \leq \frac{\delta E}{S} \quad (15)$$

$$n + n' \cdot S \leq \frac{\delta \Phi}{S} \quad (16)$$

在确定参数时,首先让系统工作在固定的低负荷条件下,确定此时最佳下垂系数,以该系数作为  $m$ 、 $n$ 。然后让系统工作在满载条件下,确定此时的最佳下垂系数,再由已经确定出的  $m$ 、 $n$  和输出功率,根据式(12)所示的线性关系,计算出  $m'$ 、 $n'$ 。最后再检验得出的系数是否满足式(15)、(16),如不满足,则需适当降低  $m'$ 、 $n'$ ,保证幅值稳定裕度和相角稳定裕度的要求。

与下垂系数为固定值的方法相比,本文提出的新方法尤其适用于负载频繁变化的电源系统中,其优点主要有一下两点:

①并联控制器能够针对不同功率大小产生与之相匹配的最佳下垂系数,保证在不同的输出功率条件下,系统都能有良好的均流效果。

②系统工作具有较低输出功率时,下垂系数有较小的值,从而提高了电压的幅值和相角稳定度,即保证在不同输出功率条件下,系统都能最优的电压稳定度。

### 3 试验验证

本文在两台 9 kVA 的单相全桥逆变器样机上进行了实验验证,运用了文中提出的新的下垂控制方法,分别在阻性负载以及阻感性负载条件下测试了样机的均流效果和电压稳定度。样机采用全数字控制,控制芯片为 TI 的 TMS320F240。

实验参数如下:

输入直流母线电压:180 V;

输出电压:110 V、400 Hz;

滤波电感:500  $\mu$ H;

滤波电容:20  $\mu$ F;

开关频率:8 kHz;

采样频率:16 kHz;

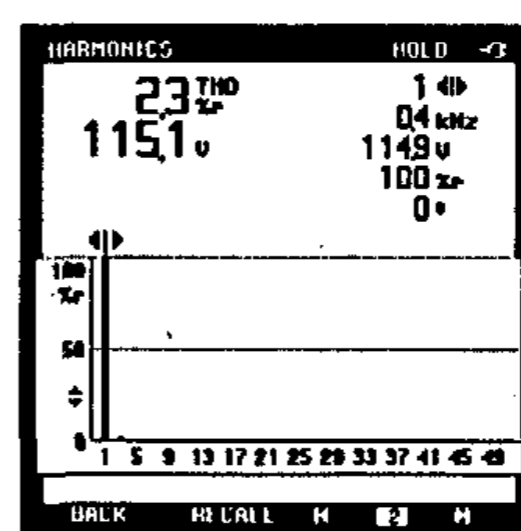
$m$ :  $2 \times 10^{-4}$  V/Var;

$m'$ :  $3 \times 10^{-7}$  V/Var<sup>2</sup>;

$n$ :  $2 \times 10^{-5}$  rad/W;

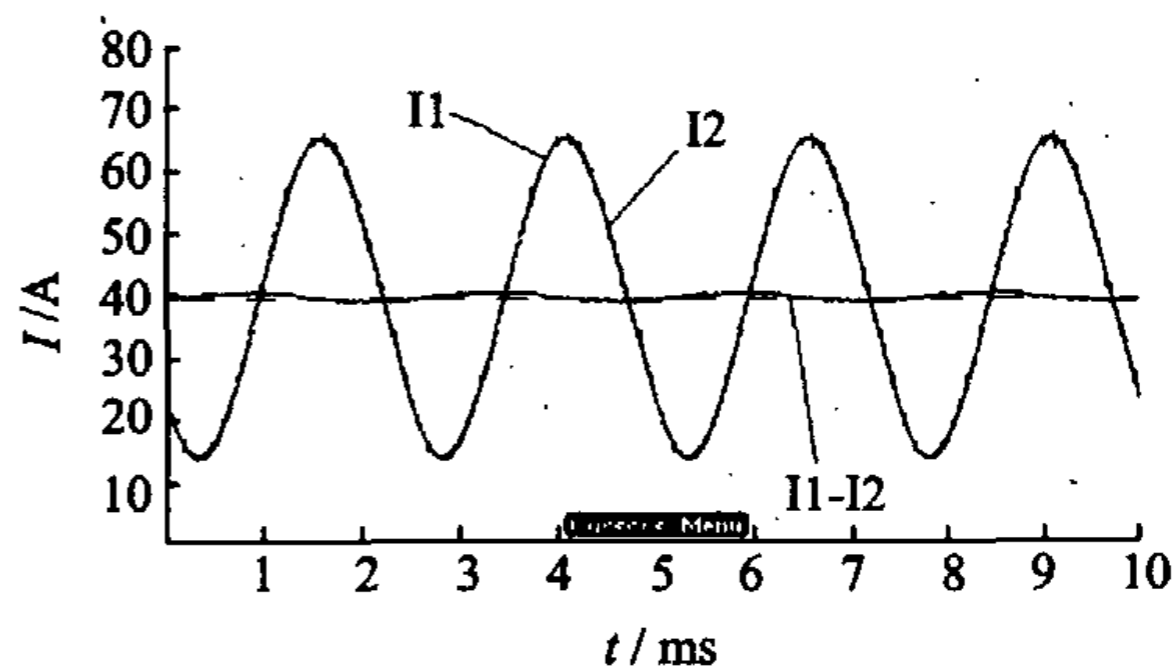
$n'$ :  $3 \times 10^{-8}$  rad/W<sup>2</sup>;

通过在不同负载条件下的实验,可得如图 8~10 所示的实验结果图。



(a) 负载电压频谱

(a) FFT of voltage of load

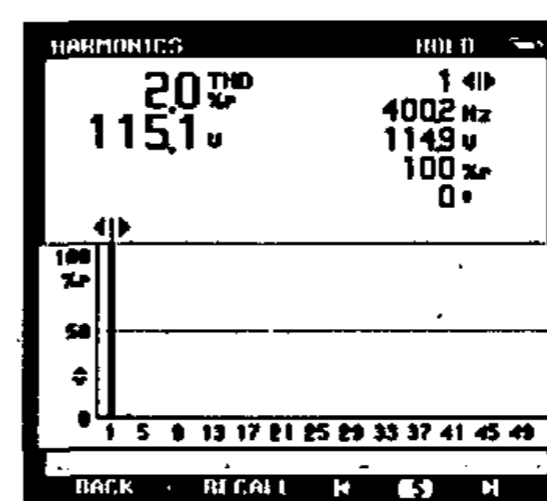


(b) 输出电流比较图

(b) Comparison of output current

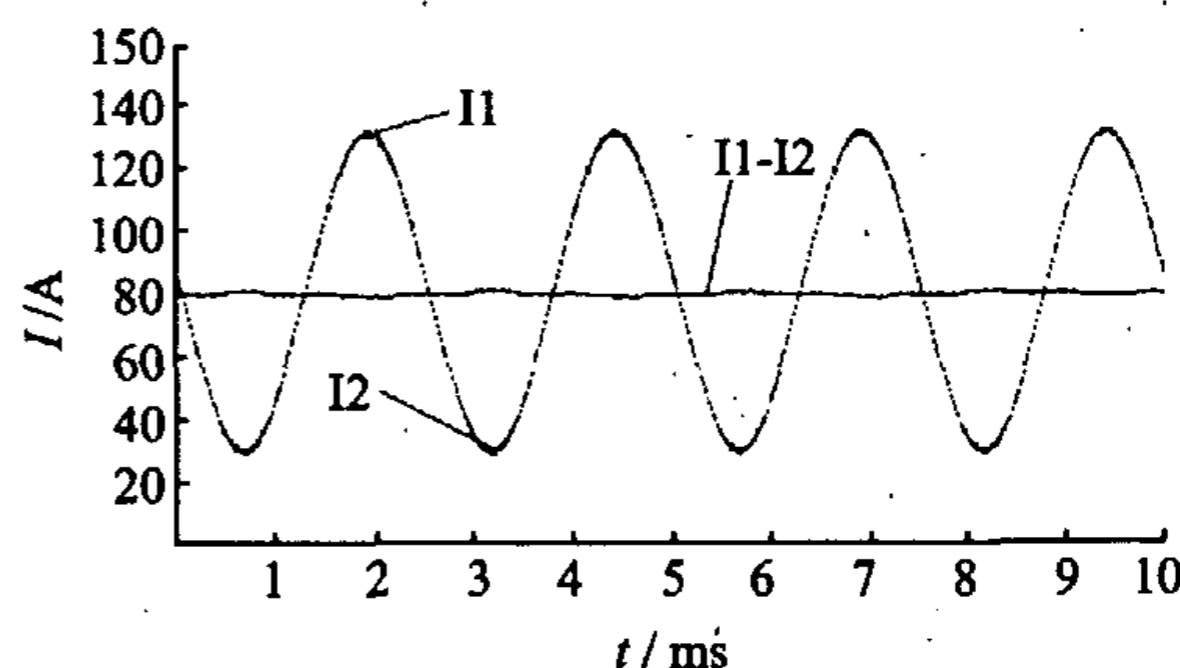
图 8 带 3.3  $\Omega$  阻性负载实验结果

Fig. 8 Experiment result under 3.3  $\Omega$  load



(a) 负载电压频谱

(a) FFT of voltage of load

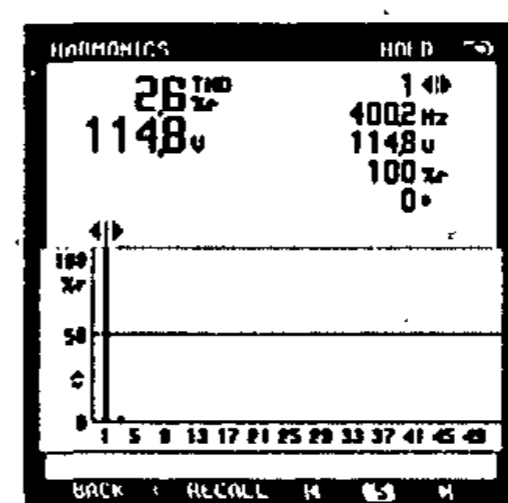


(b) 输出电流比较图

(b) Comparison of output current

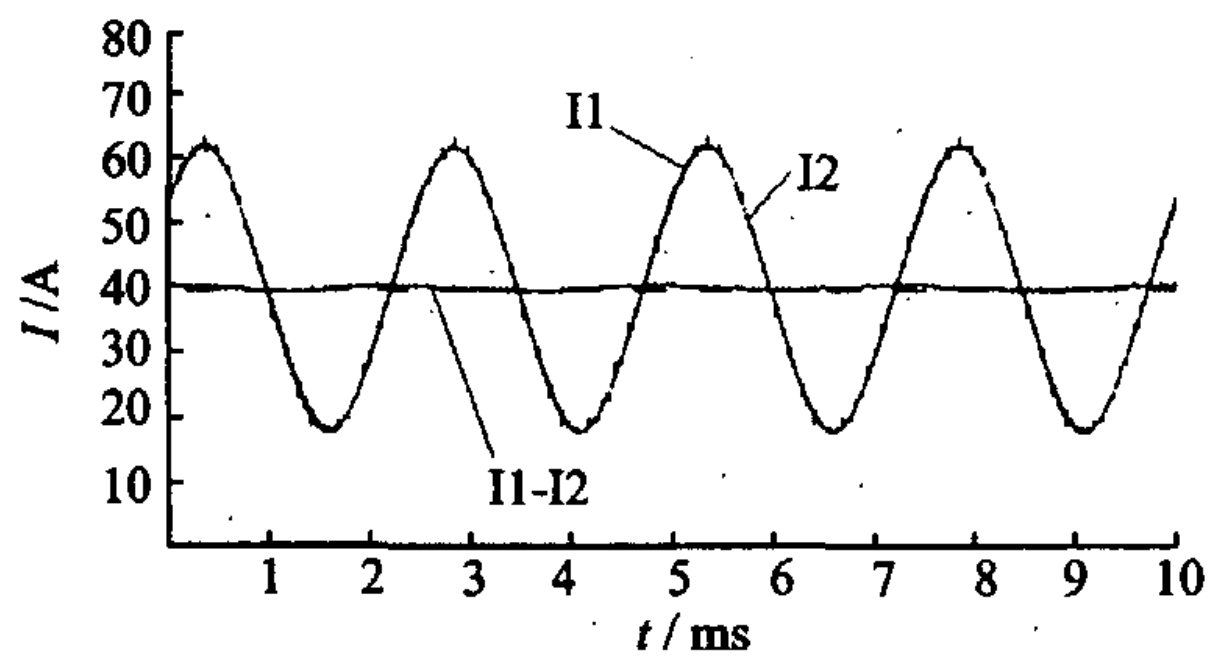
图 9 带 1.6  $\Omega$  阻性负载实验结果

Fig. 9 Experiment result under 1.6  $\Omega$  load



(a) 负载电压频谱

(a) FFT of voltage of load



(b) Comparison of output current

(b) 输出电流比较图

图 10 带  $3.3\Omega$  电阻与  $651\mu\text{H}$  电感串联的阻感性负载实验结果Fig.10 Experiment result under ( $3.3\Omega$   $651\mu\text{H} * 800$ ) load

图 8 是电源系统带  $3.3\Omega$  阻性负载的实验波形,从图中可知在这种负载条件下系统的环流峰值为  $1\text{A}$ 。

图 9 是电源系统带  $1.6\Omega$  阻性负载的实验波形,从该图中可知在这种负载条件下系统的环流峰

值为  $0.8\text{A}$ ,与图 8(b)的波形相比环流仅变化了  $0.2\text{A}$ ,说明采用了下垂系数动态调整方法以后系统在不同负载下的均流效果相似。

图 10 是电源系统带  $3.3\Omega$  电阻与  $651\mu\text{H}$  电感串联的阻感性负载的实验波形,从该图可知在这种负载条件下系统的环流峰值为  $1.2\text{A}$ ,与图 8(b)的波形相比环流仅变化了  $0.2\text{A}$ ,说明采用了下垂系数动态调整方法以后系统在阻性负载和阻感性负载下的均流效果相似。

## 5 结 论

本文提出了一种新的逆变电源并联下垂控制方法,使下垂斜率随着逆变器输出功率的变化而变化,通过仿真和试验验证,证明了该方法能够在不同的负载条件下获得很好的均流效果,并且保证并联系统输出电压的稳定。

### 参考文献:

- [1] Takao Kawabata, Shigenori Aigashino. Parallel Operation of Voltage Source Inverters[J]. IEEE Trans. Ind. Applicat, 1988, 24(2):281-287
- [2] Ernane Antonio, Alves Coelho, Porfirio Cabaleiro. Small-Signal Stability for Parallel-Connected Inverters in Stand-Alone AC Supply Systems[J]. IEEE Trans. Ind. Applicat, 2002, 38(2):533-542.
- [3] Hiroyuki Hanaoka, Masahiko Nagai. Development of a Novel Parallel Redundant UPS[M]. Japan: INTELEC, 2003:493-498.
- [4] Chih-Chiang Hua, Kuo-An Liao, Jong-Rong Lin. Parallel Operation of Inverters for Distributed Photovoltaic Power Supply System[J]. PESC, 2002, 1-4:1979-1983.