

# 逆变器并联运行的环流反馈控制

王文军, 汤钰鹏, 张 晔

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 逆变器并联运行时由于各模块输出电压的频率、相位等参数不一致, 会在模块间产生环流。先分析了逆变器并联运行时环流产生的原理。然后对加入和未加入环流反馈控制的并联逆变器系统结构做出比较, 结果表明加入环流反馈控制后, 其输出电压不变, 环流大大减少, 两台逆变器的输出电流趋于一致。最后用 Matlab 软件对此并联系统进行了仿真研究, 验证了控制方式的可行性。

**关键词:** 逆变器; 并联运行; 环流; 仿真

## Feedback control strategy of circle current in parallel inverters

WANG Wen-jun, TANG Yu-peng, ZHANG Ye

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Inverter parallel operation will have a circle current between the modules, because the module's output voltage frequency, phase, and other parameters are inconsistent. At first, this paper analyzes the principle of circle current between parallel inverters. Then it gives the comparison between the structure of inverter parallel system with circulation feedback control and the structure of inverter parallel system without circulation feedback control. The results indicate that with circulation feedback control, output voltage keeps invariant, circulating current is greatly reduced and output current of two inverters tends to coincide. At last, simulations study of parallel system with MATLAB software are done to prove its rationality.

**Key words:** inverter; parallel operation; circle current; simulation

中图分类号: TM763; TM464 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)17-0016-04

## 0 引言

随着逆变技术的发展, 多台逆变器并联运行的需求越来越大。多台逆变器并联运行可大大提高系统的灵活性, 使系统的体积大为降低, 同时其主开关器件的电流应力也可减少, 从根本上提高系统的可靠性和功率密度。为了使并联逆变器可靠地工作, 需要解决均流问题<sup>[1,2]</sup>。本文采用电压有效值反馈和环流反馈实现各逆变模块输出电压稳定, 输出电流均衡, 较好地解决了逆变器并联运行的环流问题, 具有参考价值。

## 1 并联系统的环流特性

下面以两台逆变器并联模型为例分析逆变器并联系统。图 1 为两台逆变器并联系统等效电路。其中  $U_1$ 、 $U_2$  分别为两逆变器等效输出电压,  $I_1$ 、 $I_2$  分别为两逆变器输出电流,  $Z_1$ 、 $Z_2$  为等效线路阻

抗,  $Z_L$  为负载等效阻抗,  $U_0$  为负载端电压,  $I_0$  为负载电流<sup>[3]</sup>。

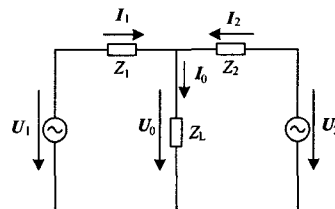


图 1 两台逆变器并联系统等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of two-inverter parallel system

由图 1 得, 负载端电压  $U_0$  的表达式如式(1)所示:

$$U_1 - Z_1 I_1 = U_2 - Z_2 I_2 = (I_1 + I_2) Z_L = U_0 \quad (1)$$

定义系统环流  $I_H$  如式(2)所示:

$$I_H = (I_1 - I_2) / 2 \quad (2)$$

由式 (1)、(2), 可得  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_H$ 、 $U_o$  的表达式分别为式 (3)、(4)、(5)、(6) 所示:

$$I_1 = \frac{(U_1 - U_2)Z_L + Z_2 U_1}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_L + Z_2 Z_L} \quad (3)$$

$$I_2 = \frac{(U_2 - U_1)Z_L + Z_1 U_2}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_L + Z_2 Z_L} \quad (4)$$

$$I_H = \frac{2(U_1 - U_2)Z_L + Z_2 U_1 - Z_1 U_2}{2(Z_1 Z_2 + Z_1 Z_L + Z_2 Z_L)} \quad (5)$$

$$U_o = \frac{U_1 Z_2 Z_L + U_2 Z_1 Z_L}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_L + Z_2 Z_L} \quad (6)$$

假定线路阻抗  $Z_1 = Z_2 = Z \ll Z_L$ , 则可得:

$$U_o \approx (U_1 + U_2) / 2 \quad (7)$$

$$I_H \approx (U_1 - U_2) / 2Z \quad (8)$$

由式 (8) 可知, 由于线路阻抗  $Z$  非常小, 2 台逆变器输出电压矢量在相位、幅值上的差异会在各逆变器的输出形成较大的电流。该电流大部分不经过负载而在逆变器之间形成环流, 环流较大时极易损坏逆变器, 必须加以控制<sup>[4]</sup>。因此控制逆变器输出电压的幅值与相位完全相同, 即可使负载端电压近似等于逆变器输出电压, 并使环流近似为零。

## 2 环流反馈控制方式

以两台逆变器并联系统为例, 得到加入环流反馈控制和交流输出电压反馈的逆变器并联系统控制框图如图 2 所示<sup>[5,6]</sup>。图中的  $U_{ref1}$  和  $U_{ref2}$  分别为逆变器 1 和逆变器 2 的基准电压,  $U_{o1}$  和  $U_{o2}$  分别为逆变器 1 和逆变器 2 的输出电压,  $G_1$  和  $G_2$  分别为逆变器 1 和逆变器 2 的开环传递函数,  $K_{v1}$  和  $K_{v2}$  分别为逆变器 1 和逆变器 2 的输出电压反馈函数,  $K_{i1}$  和  $K_{i2}$  分别为逆变器 1 和逆变器 2 的环流反馈函数,  $G_3$  和  $G_4$  分别为并联系统的输出电压传递函数和环流传递函数。

对图 2, 由式 (7)、(8), 得到  $G_3 = 0.5$ ,  $G_4 = -1/2Z$ ,  $Z$  为单台逆变器的线路等效阻抗。

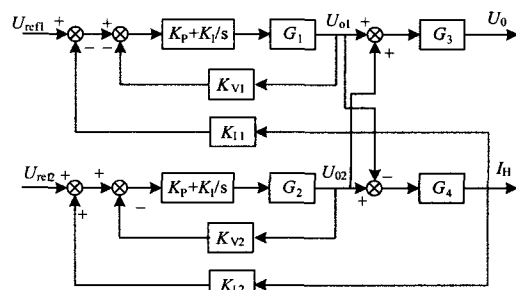


图 2 两台逆变器并联系统控制框图

Fig.2 Control block diagram of two-inverter parallel system

当没有环流反馈, 即  $K_{i1} = K_{i2} = 0$ , 可得  $U_{o1}$ 、 $U_{o2}$  的表达式如式 (9) 所示。由式 (7)、(8), 且  $U_{ref1} = U_{ref2} = U_{ref}$ , 可得  $U_o$ 、 $I_H$  的表达式如式 (10) 所示。

$$\begin{cases} U_{o1} = \frac{(K_p + \frac{K_i}{s})G_1}{1 + (K_p + \frac{K_i}{s})G_1 K_{v1}} U_{ref1} \\ U_{o2} = \frac{(K_p + \frac{K_i}{s})G_2}{1 + (K_p + \frac{K_i}{s})G_2 K_{v2}} U_{ref2} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} U_o = \left[ \frac{(K_p + \frac{K_i}{s})G_1}{1 + (K_p + \frac{K_i}{s})G_1 K_{v1}} + \frac{(K_p + \frac{K_i}{s})G_2}{1 + (K_p + \frac{K_i}{s})G_2 K_{v2}} \right] \frac{U_{ref}}{2} \\ I_H = \left[ \frac{(K_p + \frac{K_i}{s})G_1}{1 + (K_p + \frac{K_i}{s})G_1 K_{v1}} - \frac{(K_p + \frac{K_i}{s})G_2}{1 + (K_p + \frac{K_i}{s})G_2 K_{v2}} \right] \frac{U_{ref}}{2Z} \end{cases} \quad (10)$$

加入环流反馈之后, 即  $K_{i1} = K_{i2} \neq 0$ , 输出电压  $U'_{o1}$ 、 $U'_{o2}$ 、 $U'_o$  及环流  $I'_H$  之间的关系如式 (11) 所示。由式 (11), 可得  $U'_o$ 、 $I'_H$  的最终表达式如式 (12) 所示。

$$\begin{cases} U'_{o1} = \frac{(K_p + \frac{K_I}{s})G_1}{1 + (K_p + \frac{K_I}{s})G_1 K_{V1}} (U_{ref1} - I'_H K_{I1}) \\ U'_{o2} = \frac{(K_p + \frac{K_I}{s})G_2}{1 + (K_p + \frac{K_I}{s})G_2 K_{V2}} (U_{ref2} + I'_H K_{I2}) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} I'_H = \frac{U_{ref}}{2Z + K_{I1} + K_{I2}} \left[ \frac{(K_p + \frac{K_I}{s})G_1}{1 + (K_p + \frac{K_I}{s})G_1 K_{V1}} - \frac{(K_p + \frac{K_I}{s})G_2}{1 + (K_p + \frac{K_I}{s})G_2 K_{V2}} \right] \\ U'_o = \frac{U_{ref}}{2} \left[ \frac{(K_p + \frac{K_I}{s})G_1}{1 + (K_p + \frac{K_I}{s})G_1 K_{V1}} + \frac{(K_p + \frac{K_I}{s})G_2}{1 + (K_p + \frac{K_I}{s})G_2 K_{V2}} \right] \end{cases} \quad (12)$$

由式(10)和(12)比较得,加入环流反馈环节,输出电压不变,但环流得到很好的抑制。因此,理论上该系统可满足电压输出要求,且可以有效抑制环流。

### 3 仿真结果分析

#### 3.1 单台逆变器仿真分析

图3中直流电压取750V,35kW阻性负载,滤波电容 $C=15.6\mu F$ ,滤波电感 $L=6.5mH$ ,滤波电感寄生电阻 $R=0.1\Omega$ 。得到仿真波形如图4所示。其中由上到下分别是线电压瞬时值、线电压有效值、相电流瞬时值。

由图4可知,电压、电流波形平滑,滤波效果较好,虽然有电感寄生电阻存在,线电压有效值仍能稳定在380V。

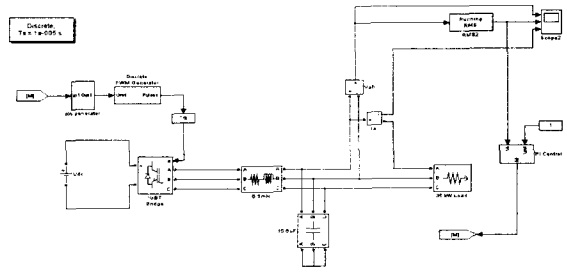


图3 单台逆变器仿真模型

Fig. 3 Simulation model of single inverter

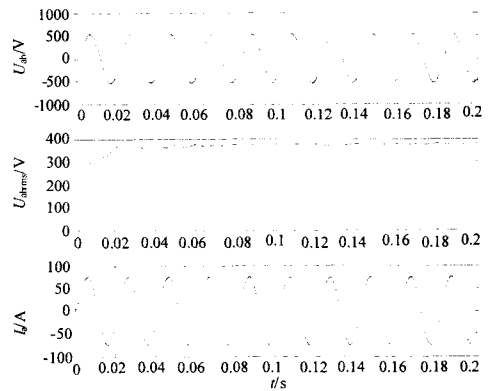


图4 单台逆变器仿真结果

Fig. 4 Simulation result of single inverter

#### 3.2 两台逆变器并联系统仿真分析

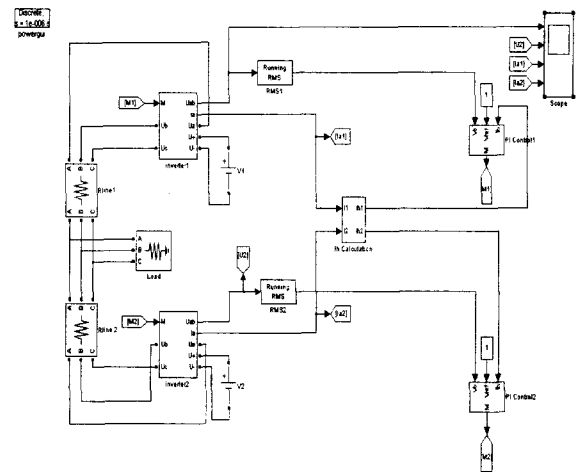


图5 两台逆变器并联系统仿真模型

Fig. 5 Simulation model of two-inverter parallel system

根据单台逆变器模型,建立两逆变器并联系统模型如图5所示。其中两台逆变器滤波参数相同,但滤波电感的寄生电阻分别为 $0.1\Omega$ , $0.2\Omega$ 。线路电阻分别为 $0.001\Omega$ , $0.005\Omega$ 。只有电压反馈,不加环流反馈的波形如图6所示。加入了环流反馈

的波形如图 7 所示。两图中, 从上至下分别为逆变器 1 电压波形, 逆变器 2 电压波形, 逆变器 1 电流波形, 逆变器 2 电流波形。由图 6、图 7 可知, 在只有电压反馈的并联系统中, 逆变器输出电压较稳定, 但不能抑制参数差异导致的输出不均流, 而加入了环流反馈后, 逆变器输出电压满足要求, 且均流效果也较好。

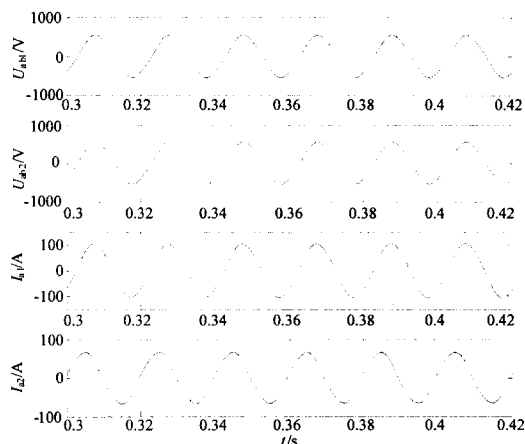


图 6 不加环流反馈的并联系统仿真波形图

Fig.6 Simulation result of inverter parallel system without circulating current feedback

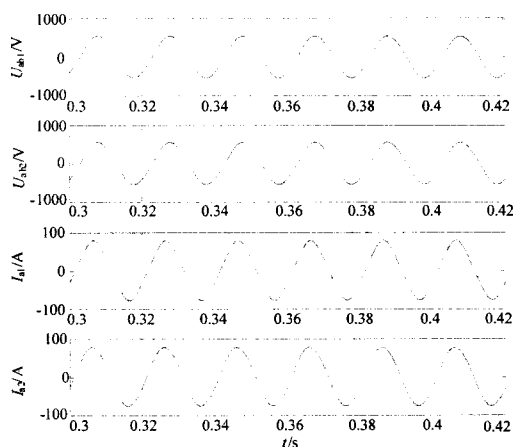


图 7 加入环流反馈的并联系统仿真波形图

Fig.7 Simulation result of inverter parallel system added with circulating current feedback

## 4 结论

本文针对逆变器并联运行中的环流问题, 提出了一种基于环流反馈的均流控制策略。由于环流反馈控制是一比例环节, 因而动态响应快, 而且这一控制策略只需要检测一个量, 即输出电流有效值, 因而电路简单, 容易实现<sup>[7]</sup>。最后通过 MATLAB/

SIMULINK 仿真软件对控制策略进行建模与仿真研究, 仿真结果证明了控制策略具有较好的均流效果, 因此该方案是可行的。

## 参考文献

- [1] 周松林. 并联逆变器的均流技术[J]. 铜陵学院学报, 2005, (3):59-61.  
ZHOU Song-lin. Current-sharing Technique of Parallel Inverter[J]. J of Tongling Institute, 2005, (3):59-61.
- [2] 黄蕾, 肖岚. 基于同步调幅的逆变器并联技术研究[J]. 电力电子技术, 2004, 38(2):18-20.  
HUANG Lei, XIAO Lan. Study of Paralleling Inverter based on Phase Synchronizing and Amplitude Modulating[J]. Power Electronics, 2004, 38(2):18-20.
- [3] 刘承旭. 低地板轻轨车辅助逆变器并联研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.11-12.  
LIU Cheng-xu. Study of Low Floor Light Rail Vehicle Parallel Auxiliary Inverter[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.11-12.
- [4] 周同旭, 周松林. 逆变器并联运行的环流反馈控制[J]. 安徽工业大学学报, 2006, 23(2):182-185.  
ZHOU Tong-xun, ZHOU Song-lin. Feedback Control Strategy of Circle Current in Parallel Converters[J]. J of Anhui University of Technology, 2006, 23(2):182-185.
- [5] 何中一, 邢岩, 付大丰. 模数混合分布式逆变器并联控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4):113-117.  
HE Zhong-yi, XING Yan, FU Da-feng. Distributed Hybrid Current Sharing Control for Inverters in Parallel Operation [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4):113-117.
- [6] XIAO Lan, HUANG Lei. A Simplified Control Technique for Inverters in Parallel Operation[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2006, 21(8):19-24.
- [7] 黄蕾. 并联逆变器控制技术的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.37-40.  
HUANG Lei. Research on the Control Technology of Parallel Inverter[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004.37-40.

收稿日期: 2008-10-10; 修回日期: 2009-02-14

作者简介:

王文军 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动; E-mail:07121974@bjtu.edu.cn

汤钰鹏 (1963-), 男, 教授, 研究方向为电力电子与电力传动, 工业控制等;

张 晔 (1983-), 女, 硕士, 研究方向为电力电子与电力传动。