

文章编号: 1671- 251X( 2010) 07- 0054- 04

# 逆变电源并联系统的谐波环流抑制研究

刘艳兵, 丁喆, 汪显博, 王军晓

(河南科技大学电子信息工程学院, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 针对逆变电源并联系统中的谐波环流问题, 在分析了单个逆变电源谐波扰动数学模型及逆变电源并联系统中谐波环流产生原理的基础上, 提出对逆变电源并联系统中的单个逆变电源模块采用电流内环、电压外环的双环控制方式, 并在逆变电源输出端增加耦合电感的方法来抑制系统中的谐波环流。理论分析及仿真结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 逆变电源; 无连线并联; 谐波环流; 抑制; 双环控制; 耦合电感

**中图分类号:** TD61; TM464 **文献标识码:** A

Research of Restraining Harmonic Circulating Current of Paralleled Inverters System

LIU Yan bing, DING Zhe, WANG Xian bo, WANG Jun xiao

(School of Electronic and Information Engineering of Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of harmonic circulation current in paralleled inverters system, a method of restraining harmonic circulating current was proposed based on analysis of mathematic model of single inverter with harmonic disturbance and produced principle of harmonic circulating current in paralleled inverters system, in which dualring control mode of current and voltage was used for single inverter of paralleled inverters system and coupling inductances were added to output ends of inverters. The theoretical analysis and simulation result verified the validity of the method.

**Key words** inverter, wireless parallel, harmonic circulating current, restraining, dualring control, coupling inductance

## 0 引言

多个模块并联供电是当今电源技术发展的重要方向之一, 多个电源模块并联不仅能提高供电的可靠性、灵活性、均分负载功率, 同时也可以降低热应力和电应力, 真正实现冗余供电, 降低成本<sup>[1~2]</sup>。

但逆变电源并联存在着均流问题, 环流、功率分配不均是导致并联失败的主要原因。对于逆变电源并联系统, 由于逆变电源输出引线的阻抗非常小, 每个模块输出的电压相位、幅值和频率等参数不能保证完全相同, 因此, 可能产生很大的环流, 导致并联失败, 严重时可能烧坏设备。本文基于逆变电源

单个模块和2个并联模块系统, 对其基本原理进行分析, 采用电压电流双环控制法对逆变电源并联系统中的谐波环流进行研究, 并在此基础上引入耦合电感。理论分析和仿真研究表明, 该方法对谐波环流有良好的抑制效果。

## 1 逆变电源谐波扰动模型

图1为单个逆变电源的谐波扰动模型, 其中 $r$ 为滤波器的等效电阻,  $L$ 为滤波电感,  $C$ 为滤波电容,  $R$ 为等效负载。

图1中, 电感 $L$ 的时域表达式为 $\frac{1}{Ls}$ , 电容 $C$ 的时域表达式为 $Cs$ , 可推得单个逆变电源传递函数为

$$G(s) = \frac{U_0(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{CLs^2 + [(L/R) + rC]s + 1 + (r/R)} \quad (1)$$

收稿日期: 2010- 03- 19

作者简介: 刘艳兵(1985- ), 男, 山东枣庄人, 河南科技大学控制理论与控制工程专业在读硕士研究生, 主要研究方向为无互联线逆变电源并联系统。E-mail: liuyanbing@126.com

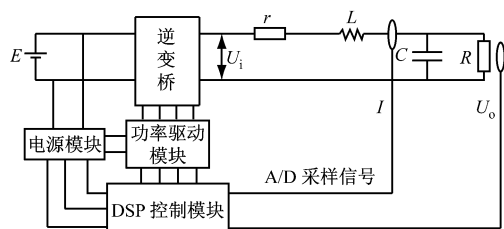


图 1 单个逆变电源谐波扰动模型

采用双极性正弦脉宽调制技术, 得单个逆变电源的传递函数为

$$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_m(s)} = \frac{1}{CLs^2 + [(L/R) + rC]s + (r/R) + 1} \cdot \frac{E}{V_{tri}N} \quad (2)$$

式中:  $U_m$  为正弦信号  $u_m = U_m \sin(\omega t)$  的幅值;  $V_{tri}$  为三角载波峰值。

## 2 逆变电源并联系统的环流特性分析

2 台逆变电源的并联数学模型如图 2 所示, 其中  $u_{o1}$  和  $u_{o2}$  为 2 台逆变电源的输出电压;  $R_{i1}$ 、 $R_{i2}$  为线路的等效阻抗,  $jX_{i1}$ 、 $jX_{i2}$  为其感抗, 并认为  $R_{i1} = R_{i2} = R_i$ ,  $X_{i1} = X_{i2} = X_i$ ;  $u_0$  为交流母线电压;  $I_H$  为系统环流。

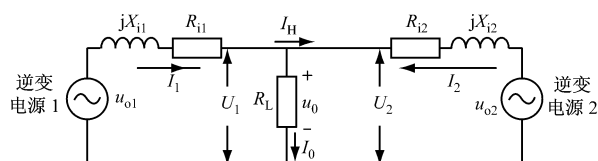


图 2 2 台逆变电源的并联数学模型

令  $u_{o1} = U_{o1} \angle \beta_1$ ,  $u_{o2} = U_{o2} \angle \beta_2$ , 则有

(1) 当  $\beta_1 = \beta_2$ 、 $U_{o1} \neq U_{o2}$  时

$$I_H = \frac{U_{o1} - U_{o2}}{2(R_i + jX_i)} = \frac{\Delta U_o}{2\sqrt{R_i^2 + X_i^2}} \angle(-\alpha) \quad (3)$$

$$P_H = \frac{\Delta U_o U_o}{2\sqrt{R_i^2 + X_i^2}} \cos \alpha \quad (4)$$

$$Q_H = \frac{\Delta U_o U_o}{2\sqrt{R_i^2 + X_i^2}} \sin \alpha \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  为阻抗等效输出角;  $P_H$ 、 $Q_H$  分别为逆变电源并联系统的有功、无功环流。

(2) 当  $U_{o1} = U_{o2}$ 、 $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2 \neq 0$  时

$$I_H \approx \frac{\Delta\beta U_{o1}}{2\sqrt{R_i^2 + X_i^2}} \angle\left[\frac{\pi}{2} - \alpha + \frac{\Delta\beta}{2}\right] \quad (6)$$

$$P_H = \frac{U_{o1} U_o \Delta\beta}{2\sqrt{R_i^2 + X_i^2}} \sin \alpha \quad (7)$$

$$P_H = \frac{U_{o1} U_o \Delta\beta}{2\sqrt{R_i^2 + X_i^2}} \sin \alpha \quad (8)$$

从式(3)~(8)可见, 逆变电源的幅值和相位差的大小决定了环流的大小, 逆变电源并联系统环流的大小和输出阻抗成反比, 且与实际负载无直接联系, 即使 2 台逆变电源的给定电压完全相同也不可能完全消除环流, 且 2 台逆变电源的输出电压之差与环流成比例。

环流分量中既包含基波环流, 也包括谐波环流。在逆变电源并联系统中包含了大量的低次谐波环流, 给系统并联带来了很大的困难。由于低次谐波是系统固有的, 无法通过改变正弦脉宽调制偏差电压进行控制, 也无法通过检测谐波环流并在给定电压中加入谐波进行抵消。一个瞬时值反馈能够抑制电压偏差产生的谐波失真, 同样也能抑制环流。使逆变电源的元器件参数尽量保持一致是很好的抑制环流的方式, 但是这样为逆变电源的批量生产带来较大的麻烦, 因此, 用微控制器尽量采用数字化控制是减少谐波的有效方式。

## 3 双环控制逆变电源并联系统谐波环流的抑制

为抑制逆变电源并联系统的谐波环流, 单个逆变电源采用电流内环、电压外环的双环控制方式, 如图 3 所示。

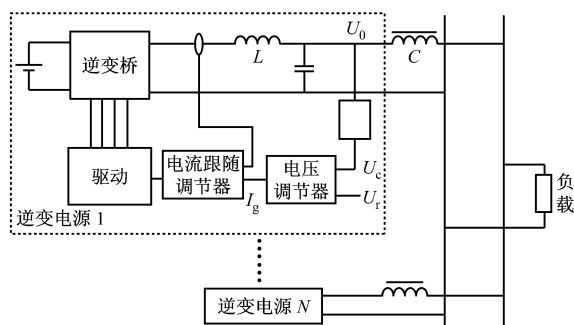


图 3 双环控制逆变电源并联系统的电路原理

比较电压瞬时值与给定信号, 得出偏差电压  $U_e$ ,  $U_e$  经过电压调节器调节, 得出的信号作为电流的参考, 将其与采样瞬时电流比较, 获得电流误差信号, 该信号经电流跟随调节器调节获得调制波信号。在调制波信号中, 开关器件的死区效应等因素引起的电压误差可以看作是一种扰动信号, 里面既包含基波分量也包括谐波分量, 既影响到稳压也引起电压波形失真, 因此, 只要抑制住偏差电压, 就能解决稳压和电压波形失真问题。

逆变电源双环控制结构框图如图 4 所示<sup>[3]</sup>。

从图 4 可得出该逆变电源的传递函数为

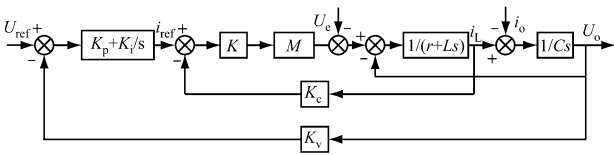


图 4 逆变电源双环控制结构框图

$$U_o(s) = \frac{KM(K_p + K_i/s)U_{ref}(s)}{KM[K_cCs + K_v(K_p + K_i/s)] + LCs^2 + rCs + 1} - \frac{U_e(s)}{KM[K_cCs + K_v(K_p + K_i/s)] + LCs^2 + rCs + 1} - \frac{(Ls + r)I_o(s)}{KM[K_cCs + K_v(K_p + K_i/s)] + LCs^2 + rCs + 1} \quad (9)$$

令  $Be(s) = KM[K_cCs + K_v(K_p + K_i/s)] + LCs^2 + rCs + 1$ , 则有

$$V_o(s) = \frac{KM(K_p + K_i/s)V_{ref}(s)}{Be(s)} - \frac{U_e(s)}{Be(s)} - \frac{(Ls + r)I_o(s)}{Be(s)} \quad (10)$$

为有效抑制环流, 在图 3 中负载输出端加入耦合电感, 并设其电感值为  $L_k$ 。由环流定义:  $i_H(t) = [i_1(t) - i_2(t)]/2$ , 得  $I_H(s) = \frac{U_1(s) - U_2(s)}{2sL_k}$ , 结合式(9)可进一步得出环流表达式为

$$I_H(s) = \frac{KM(K_p + K_i/s)\Delta V_{ref}(s)}{Ls + r + L_kBe(s)} - \frac{\Delta U_e(s)}{Ls + r + L_kBe(s)} \quad (11)$$

从式(10)可看出, 由于  $Be$  值较大, 对谐波环流起到了抑制作用, 能很好地适应线性负载, 但是对于

负载非线性变化的适应能力有点差。在逆变电源输出端加上耦合电感, 将电压偏差信号作为假定的扰动信号放在电流内环之外, 则可有效抑制逆变电源联系统的电压偏差和谐波环流。

从式(11)可看出, 谐波环流的大小与耦合电感的值成反比关系, 耦合电感的存在使得环流大为减小。假定 2 个电感的匝数都为  $N$ , 2 个电感耦合在同一个铁芯上, 当逆变电源间环流很小时假定无环流, 即  $I_1 = I_2$ , 则铁芯的磁通为

$$\phi = \frac{L_1 \times I_1}{N_1} - \frac{L_2 \times I_2}{N_2} = 0 \quad (12)$$

由式(12)可得出, 耦合电感的耦合作用使得电感间的磁通相互抵消, 电感值等效为零, 所以逆变电源耦合电感的存在对电压的稳定精度无任何影响。

4 仿真研究

为验证理论分析的正确性, 在 Matlab/Simulink 环境下建立单个逆变电源仿真电路, 如图 5 所示<sup>[4]</sup>。仿真参数:  $L = 1 \text{ mH}$ ,  $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $U_{dc} = 220 \text{ V}$ 。图 5 中单个逆变电源的电压电流双环控制仿真采用传统的 PQ 下垂理论确定给定电压和给定电流, 下垂系数:  $m_1 = 4.2 \times 10^{-3}$ ,  $k_1 = 0.1$ ,  $j_1 = 5.19 \times 10^{-2}$ ,  $m_2 = 5.3 \times 10^{-3}$ ,  $k_2 = 1.26 \times 10^{-2}$ ,  $j_2 = 1.5 \times 10^{-3}$ 。PQout 模块用于计算逆变模块的瞬时有功功率和无功功率。未加入耦合电感时逆变电源的输出电压波形如图 6 所示, 在逆变电源输出端加上耦合电感之后的输出电压波形如图 7 所示。

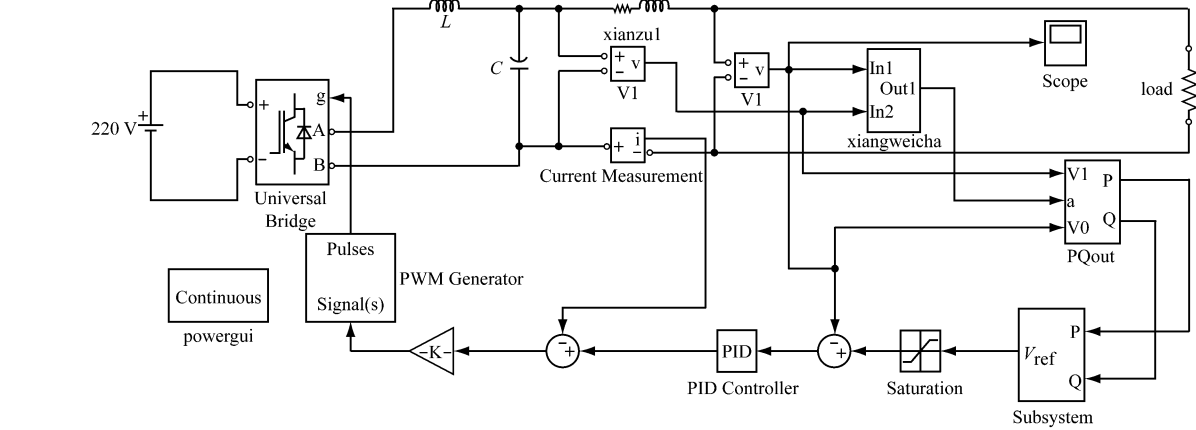


图 5 单个逆变电源仿真电路

比较图 6 和图 7 可看出, 加入耦合电感后逆变电源中的谐波得到了明显抑制, 与理论分析结论一致。

在单个逆变电源的基础上, 采用无互联线逆变

电源并联方法实现用 2 个逆变电源为同一负载供电, 并建立仿真模型, 仿真得到 2 个逆变电源间的环流波形如图 8 所示。从图 8 可看出, 2 个逆变电源间的环流很小, 仿真结果与理论分析一致。

文章编号: 1671-251X(2010)07-0057-05

# 恒温检测方法在检测混合气体中的应用

于震<sup>1</sup>, 张正勇<sup>2</sup>

(1. 渤海大学物理系, 辽宁 锦州 121000; 2. 中国科学院合肥智能机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 根据催化燃烧气体传感器的敏感机理, 讨论了催化燃烧气体传感器检测电桥在恒压源供电情况下的输出与补偿元件和敏感元件电阻变化之间的关系; 应用补偿元件和敏感元件的电阻与其工作温度变化的关系及热平衡方程, 推导出了催化燃烧气体传感器输出与被测气体浓度之间的关系, 且得出催化燃烧气体传感器的输出是线性的; 提出了采用  $n$  个催化燃烧气体传感器分别工作在不同温度下, 根据每个传感器的输出计算出由  $n$  种气体组成的混合气体中的各组分浓度的方法。试验结果表明, 应用该方法检测混合气体各组分浓度时, 最大检测相对误差小于 10%, 且相对误差与浓度没有严格的依赖关系。

**关键词:** 催化气体传感器; 混合气体; 恒温检测; 热敏电阻; 热平衡分析

**中图分类号:** TD712.3 **文献标识码:** A

收稿日期: 2010-03-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50534050), 国家 863 计划课题(2007AA04Z332)

作者简介: 于震(1977-), 男, 辽宁朝阳人, 助教, 硕士, 2008年毕业于中国科学技术大学, 现主要从事传感器技术方面的教学与研究工作。E-mail: menghan202@163.com

## 0 引言

催化燃烧气体传感器与其它种类的气体传感器相比, 在检测可燃性气体方面具有一定的优势, 特别是由于它具有一定的抗高温、粉尘等恶劣环境的能力以及体积小、价格低等优点, 在煤矿瓦斯检测中发

由死区等造成的脉宽调制波偏差电压看作是一种谐波扰动, 建立了基于谐波扰动的逆变电源数学模型, 根据这一模型得出逆变电源并联系统中的谐波环流产生原理, 提出了采用电流内环、电压外环的双环控制及增加耦合电感的谐波环流抑制方案。理论分析和仿真结果表明, 该方案有效地抑制了逆变电源并联系统的谐波环流。

## 参考文献:

- [1] GUERRERO J M, VICUNA L G, MIRET J, et al. A Wireless Controller to Enhance Dynamic Performance of Parallel Inverters in Distributed Generation Systems [J]. IEEE Trans. Power Electronics, 2004, 19(5).
- [2] CHEN Liangliang, XIAO Lan, GONG Chunying, et al. Circulating Current's Characteristics Analysis and the Control Strategy of Parallel System Based on Double Close-loop Controlled VSI [C]//35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004, Aachen: 4791-4797.
- [3] 张宇. 三相逆变器动态特性及其并联系统环流抑制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [4] 张宇, 康勇. 逆变器并联系统中谐波环流的抑制[C]//中国电源学会第十六届学术年会, 2005, 深圳.

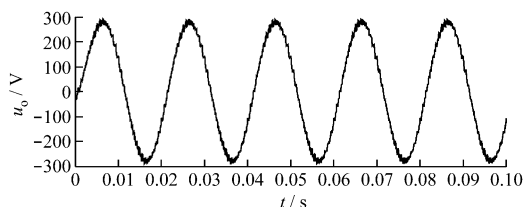


图6 未加耦合电感时的逆变电源输出电压波形

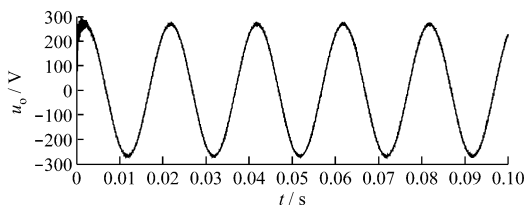


图7 加入耦合电感时的逆变电源输出电压波形

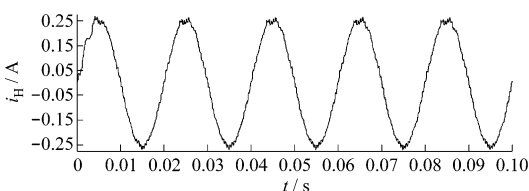


图8 2个逆变电源并联系统的环流波形

## 5 结语

详细分析了逆变电源及其并联的基本原理, 将