电流型控制半桥逆变器研究（I）
——直流分压电容不均压问题

陈东华　谢少军
（南京航空航天大学自动化学院　南京　210016）

摘要　电流型控制半桥逆变器直流分压电容电压存在偏差，电容中点的电压偏移容易导致输出电压和电流波形的畸变，使电路性能恶化，甚至使系统失控。文中分析了电流型控制半桥逆变器分压电容不均压产生的原因，给出电容中点电压偏移的理论值，讨论了电容不均压问题对整个逆变器系统造成的影响。仿真和实验结果证实理论分析的正确性。由于该问题的存在，限制了电流型控制半桥逆变器的实用性。

关键词：逆变器　半桥电路　电流型控制　不均压
中图分类号：TM464

Research on Current-Mode Control Half-Bridge Inverter(I)
——Voltage Un-Balance of Input Capacitors

Chen Donghua　*Xie Shaojun*
(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics　Nanjing　210016　China)

Abstract　Voltage un-balance of input capacitors in the current-mode control half-bridge inverter, which will easily distort the output voltage and current waveform, often worsens the circuit characteristic and even makes the circuit uncontrollable. The cause of voltage un-balance is analyzed in detail and the theoretical value of un-balanced voltage is deduced in this paper. The theoretical analysis result of the voltage un-balance is verified by the simulation and experimental results. Because of the voltage un-balance, the practicality of the current-mode control half-bridge inverter is restricted.

Keywords：Inverters，half-bridge circuit，current-mode control，voltage un-balance

1　引言

在中小功率应用场合，半桥电路由于其结构简单、功率器件少且功率管承受的电压应力小，得到广泛使用。由于目前逆变器多采用电流瞬时值控制技术，电流瞬时值控制精度高，系统动态响应好，但是在电流型瞬时值控制半桥逆变电路中，存在着直流分压电容不均压问题，从而使分压电容中点电压漂移，导致输出电压和电流波形的畸变，使电路性能恶化，甚至使系统失控。本文对半桥逆变器分压电容不均压的产生原因进行了深入的分析，给出了电容中点电压偏移的理论值，研究了电容不均压问题对整个逆变器系统造成的影响。

2　半桥型逆变器电流瞬时值控制原理

目前的逆变器一般采用电压电流瞬时值双环控制，相比传统的电压型控制逆变器而言，这种逆变器具有参数鲁棒性好，输出波形质量好，动态响应快和非线性负载能力较强等特点。

图 1 所示电流型控制半桥逆变器的控制电路框图，其控制原理为：电压反馈与电压基准比较后经过电压调节器得到电流基准信号 i_g，电感电流的反馈信号与电流基准比较后得到的误差信号 i_e 经过迟滞开关或载波交截电路产生 PWM 波，控制功率器件的开关。

收稿日期 2003-06-13　改稿日期 2003-10-16

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

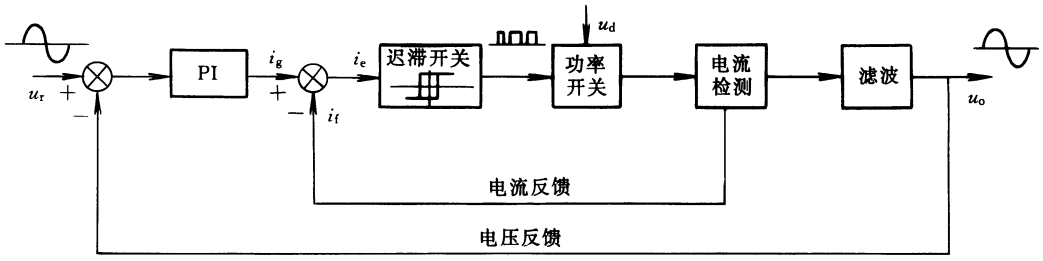


图 1 电流型控制半桥逆变器控制电路框图

Fig.1 Control block diagram of the current-mode control half-bridge inverters

3 电流型控制半桥逆变器电容中点电压偏移

采用电流型控制半桥逆变器主电路如图 2 所示，两个直流分压电容 C_1、C_2 形成了中点 0，U_d 是恒定的直流输入电压，$u_{C1}+u_{C2}=U_d$，故可以得到 $i_{C1}+i_{C2}=0$，即分压电容的电流大小相等，方向相反。对于节点 0，应用基尔霍夫定律有 $i_{C1}+i_L=i_{C2}$，所以 $i_{C1}=-i_L/2$，即分压电容 C_1 的电流与电感电流反相，且幅值是电感电流的一半。

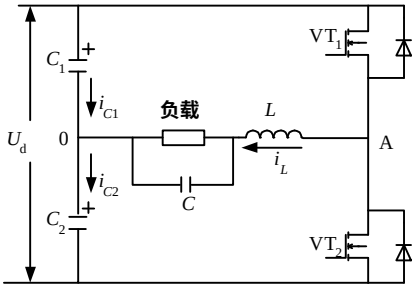


图 2 半桥逆变器主电路

Fig.2 Half-bridge inverter circuit

一般半桥分压电容 $C_1=C_2$，所以可以认为在逆变器开始工作前电容初始电压为 $U_{C10}=U_{C20}=U_d/2$。设 $i_L=\sqrt{2}I_L\sin(wt+q)$，其中 q 是电感电流初始相位角，取决于开机瞬时输出电压参考波的瞬时值，是一个随机量。

如图 3 所示，当 q 为 0 时，在 $0<wt<\pi/2$ 期间，i_L 从 0 开始依正弦规律增大，u_{C1} 从 $U_d/2$ 开始依正弦规律减小，在 $\pi/2$ 时，i_L 达到正的最大值；在 $\pi/2<wt<\pi$ 期间，i_L 从峰值依正弦规律减小为 0，由于 u_{C1} 是对 i_L 的反相信号的积分，所以在 $wt=\pi$ 时达到最小值；在 $\pi<wt<3\pi/2$ 期间，i_L 从 0 依正弦规律减小，u_{C1} 从反相最小值开始往上增大；在 $3\pi/2<wt<2\pi$ 期间，i_L 从最小点回到起始点 0，u_{C1} 则到达最大点即起始点 $U_d/2$。每个周期重复以上过程，

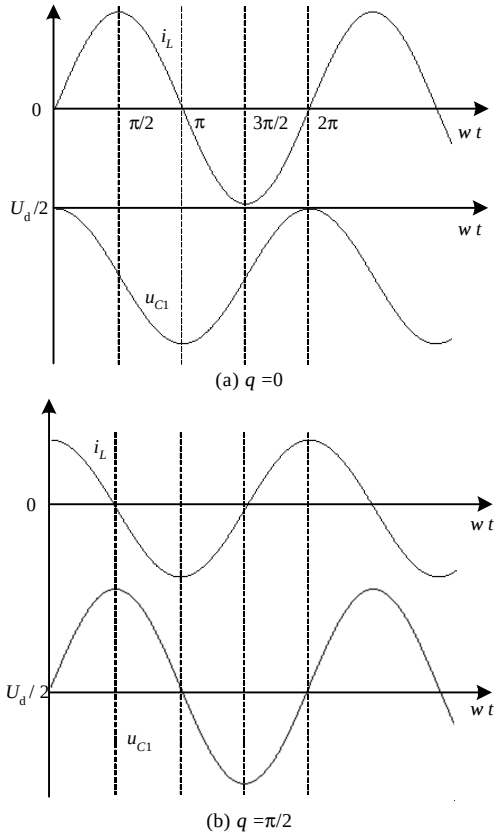


图 3 电感电流和分压电容电压波形

Fig.3 Waveforms of inductive current and voltage on DC-link capacitor

电容 C_1 上的平均电压值小于 $U_d/2$。

当 q 为 $\pi/2$ 时，在 $0<wt<\pi/2$ 期间，i_L 从正的最大值开始依正弦规律减小，u_{C1} 从 $U_d/2$ 开始依正弦规律减小，在 $\pi/2$ 时，i_L 等于 0，u_{C1} 达到负向最大值；在 $\pi/2<wt<\pi$ 期间，i_L 从 0 增加到负向最大，u_{C1} 回到 $U_d/2$；在 $\pi<wt<3\pi/2$ 期间，i_L 从负向最大依正弦规律开始上升，u_{C1} 从 $U_d/2$ 开始依正弦规律增大；在 $3\pi/2<wt<2\pi$ 期间，i_L 从 0 回到起始点，u_{C1} 则从正向最大值回到起始点 $U_d/2$。

从上面分析可以知道，在电路工作时，分压电容的电压存在着依正弦规律的波动，且电容电压的平均值与 q 有关，不同的 q 角，电容电压的平均值不一样。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

分析可以得出

$$u_{C1}=\frac{1}{C_1}\int_0^t i_{C1}\mathrm{d}t+U_{C1o}=\frac{\sqrt{2}I_L}{2wC_1}[\cos(w\,t+q)-\cos q]+U_{C1o} \tag{1}$$

则电容电压脉动

$$\Delta u_{c1}=u_{c1\max}-u_{c1\min}=\frac{\sqrt{2}}{w\,C_1}I_L \tag{2}$$

电容平均电压

$$\bar{u}_{C1}=U_{C1o}-\frac{\sqrt{2}}{2w\,C_1}I_L\cos q \tag{3}$$

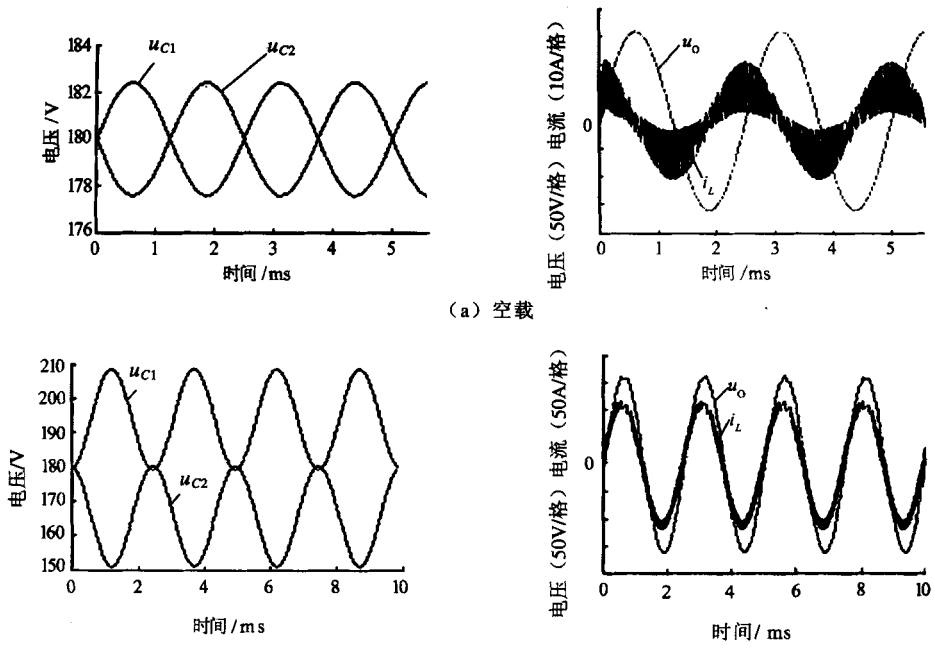
两个电容电压的不平衡值为

$$\Delta u=|\bar{u}_{C1}-\bar{u}_{C2}|=\frac{\sqrt{2}I_L}{w\,C}\cos q \tag{4}$$

4　仿真分析

对采用半桥主电路结构的电流滞环瞬时值控制逆变器进行仿真，仿真逆变器的参数为：输入电压：DC360V，输出电压：115/400Hz，额定功率：6kVA，C_1=C_2=1000μF，滤波电感：L=0.12mH，滤波电容：C=30μF。

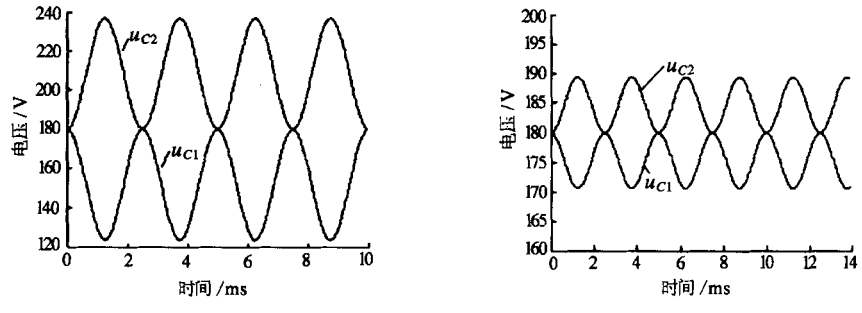
图 4 为不同电感电流起始相位角时分压电容两端电压及输出电压和电感电流仿真波形。由图中可见，u_r 初始角为 0°,空载时相应于电感电流起始相位角为π/2，两个直流分压电容的平均值相等。u_r 初始角为 0°，阻性满载时，相应于电感电流起始相位角 q =9.41°,两分压电容电压平均值存在较大的偏差,由于该偏差，导致输出电压出现了明显的畸变现象。图 5 为 u_r 初始角为 0° 阻性满载时，分压电容容值对分压电容两端电压的影响。仿真结果表明增大分压电容容值可减小电容电压偏差量。



（a）空载　　(b) 阻性满载

图 4　u_r 初始角为 0° 时分压电容两端电压及输出电压和电感电流仿真波形

Fig.4　Simulation waveforms of voltage on DC-link capacitor, inductive current and output voltage when u_r initial angle is 0°



(a) C_1=C_2=500μF　　(b) C_1=C_2=3000μF

图 5　分压电容容值不同时分压电容电压波形

Fig.5　Simulation waveforms of the voltage on DC-link capacitor under different capacitor value

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图 6 为在感性负载（1kVA）条件下，分压电容两端电压及输出电压和电感电流仿真波形。从仿真波形可以看出，当在 $\cos j = 0.9$ 时，电容电压偏差较小，输出电压和电流几乎没有畸变；但当 $\cos j = 0.01$ 时，电容电压偏差较大，输出电压和电流严重畸变，电路不能正常工作。

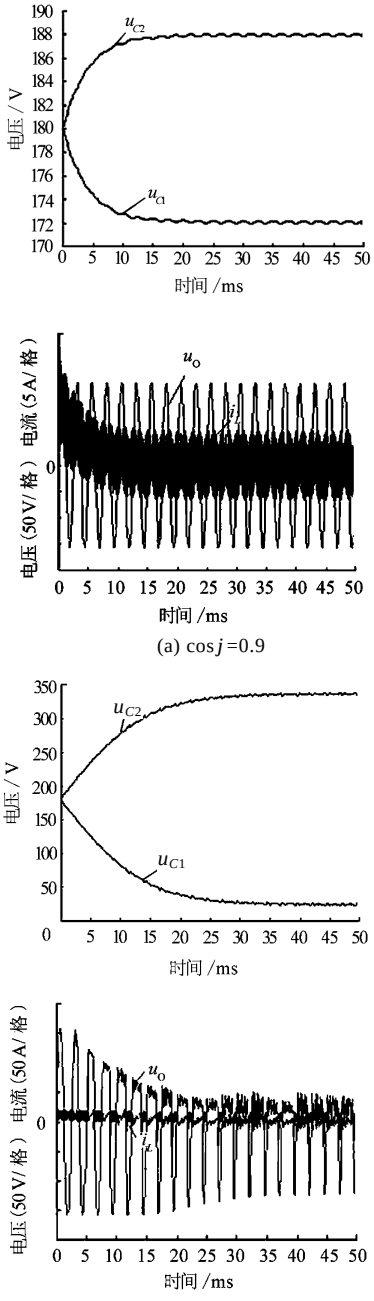
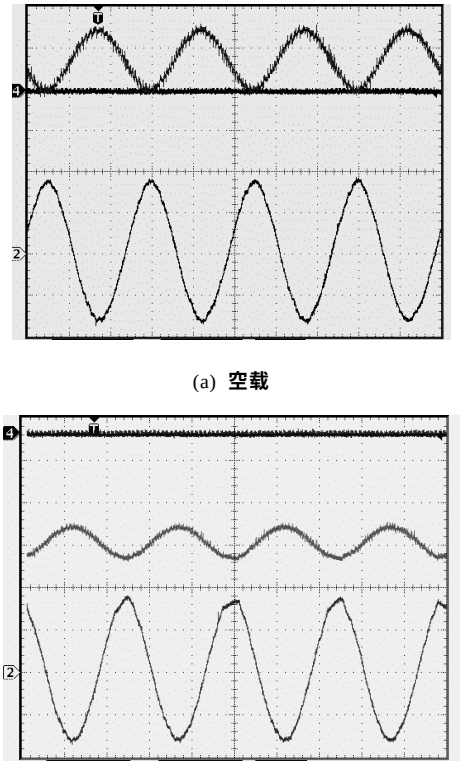


图 6 1kVA 感性负载时分压电容两端电压及输出电压和电感电流仿真波形

Fig.6 Simulation waveforms of voltage on DC-link capacitor, the inductive current and output voltage under 1kVA inductive load

5 实验结果

图 7 是在 360V 直流输入，输出为 115V/400Hz，分压电容为 C_1=C_2=940μF 条件下，电流型控制半桥逆变器空载和轻载（I_0=1A, $\cos j = 1.0$）的电容电压和输出电压波形。



(a) 空载

(b) 轻载（I_0=1A）

图 7 电流型控制半桥逆变器电容电压和输出电压波形

Fig.7 Experimental waveforms of voltage on DC-link capacitor and output voltage

实验结果验证了电流型控制半桥逆变器的直流电容电压偏差问题，在负载电流 I_0=1A 时，电容中点电压偏差已经导致电路输出电压和电流波形畸变。

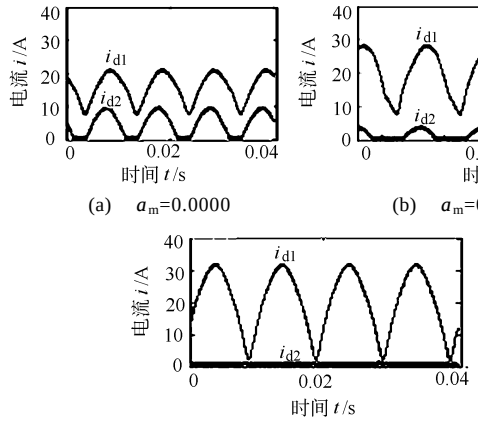
6 结论

（1）半桥电流型控制逆变器存在直流分压电容不均压的问题，这主要是由于电感电流对两个分压电容周期性充放电引起的。由于电感电流相位的原因，半桥分压电容两端的电压会有一定的直流偏差，正常稳态工作时，电压的偏差量为：$Du = \dfrac{\sqrt{2} I_L}{w C} \cos q$。

（2）由于 q 是一个随机量，不可以控制，所以电路在正常工作时，可能出现的最大偏差为

（下转第 51 页）

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) a_m=0.0000　　(b) a_m=0.1667

(c) a_m=0.0500

图 13　断相时双桥整流电流实测波形

Fig.13　Broken line rectifier current experimental waveforms of the two parallel bridges

5　结论

变抽头六相整流系统的断相运行可等效为并联单相桥式整流电路，变抽头此时不起作用，直流供电品质下降，脉动系数约为 66.7%，电磁干扰变大，双桥输出电流严重不平衡，必须避免整流系统长期工作于断相状态，当系统发生断相时应快速切换为蓄电池供电。本文通过对电路断相故障的理论分析、仿真研究和实验验证，查明了故障运行机理，为系统的断相故障检测与实时处理提供了充分依据。

参考文献

1　Shota Miyairi, Shoji Iida, Kiyoshi Nakata, et al. New method for reducing harmonics involved in input and output of rectifier with interphase transformer. IEEE Trans. on Industry Application, 1986, 22(5)：790～797

2　Arrillaga J, Villablanca M E. Pulse doubling in parallel convertor configurations with interphase reactors. IEE Proc. 1991,138(1)：15～20

3　潘启军，刘德志. 带有变抽头均衡电抗器的六相整流电路的分析. 海军工程大学学报，1999(1)：13～18

4　潘启军. 抑制整流装置谐波的方法研究：［硕士学位论文］. 海军工程大学, 1999

作者简介

潘启军　男，1972 生，博士研究生，研究方向为电力电子应用及电磁兼容性。

马伟明　男，1960 生，博士，教授，博士生导师，工程院院士，从事独立电源系统、电力电子及电力系统电磁兼容性等方面的研究。

（上接第 88 页）

$Du=\frac{\sqrt{2}I_L}{w\,C}$。

（3）电容中点电压偏差会导致逆变器输出电压和电流波形畸变，严重时甚至使系统失控。

（4）可以通过增大分压电容的电容值或者减小电感电流使电容电压的偏差减小，也可以在分压电容上并联较大功率电阻来减小分压电容电压偏差，但这些方法都是以增大系统体积重量或降低系统效率为代价的，并且不能保证各种负载情况下逆变器均能正常工作。

参考文献

1　Kang B J, Liaw C M. Random hysteresis PWM inverter with robust spectrum shaping IEEE Trans on Aerospace and Electronic System , 2001(2)：619～629

2　Buso S, Malesan L. Comparison of current control techniques for active filter applications. IEEE Trans. on IE,1998,45(2)：722～729

3　QIAN C , SMEDLEY K M. A topology survey of single-stage power factor corrector with a boost type input-current-shape. IEEE Trans. on PE, 2001,16(3)：360～367

作者简介

陈东华　男，1979 年生，博士研究生，研究方向为功率变换。

谢少军　男，1968 年生，副教授，研究方向为功率变换和航空电源。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net