

单 DSP 控制两级变换逆变器

王凤岩^{1,2}, 赵伟刚¹, 许建平²

(1. 电子科技集团公司第29研究所电子对抗国防科技重点实验室, 四川 成都 610036;

2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 本文研究了一种单 DSP 控制“DC/DC 直流变换器 + DC/AC 逆变器”两级变换器, 介绍了电路的基本原理, 在建立数字控制 DC/DC 直流变换器和 DC/AC 逆变器精确模型的基础上设计了两级变换器的控制传递函数, 对数字控制的时间延迟对控制性能的影响进行了理论和仿真分析研究。并在 500VA 28VDC/115V 400Hz 逆变器样机上进行了实验, 对设计电路和控制传递函数设计的有效性进行了验证。

关键词: 逆变; 变换器; 数字控制; DSP

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2007)04-0060-05

1 引言

两级变换是逆变电源常采用的一种实现方式, 即先采用隔离的 DC/DC 变换电路升高直流电压, 再采用非隔离的桥式 DC/AC 逆变电路产生正弦电压输出。因此高频 DC/DC 部分和 DC/AC 部分的控制相对独立, 整个功率电路可以分为 DC/DC 变换器和 DC/AC 变换器两部分独立设计和调试^[1]。

采用模拟控制的两级变换逆变电源中, DC/AC 变换器往往是开环控制, 这样虽然前级 DC/DC 变换对输入电压扰动具有较好的抑制能力, 但是对于负载扰动的响应速度很慢, 并且难以得到高质量的静态波形^[2]。基于此本文研制了一种两级都是闭环控制的逆变电源, 并且两级采用同一片 DSP 进行反馈控制。该设计不但简化了控制部分的硬件电路, 而且对输入和输出扰动都具有很好的抑制能力。电源的主要指标为: 功率 500VA, 输入电压 28VDC; 输出 400Hz 115V 正弦电压。

此外逆变器在采用 DSP 反馈控制后, 若仍然采用传统的连续域的方法来设计校正传递函数, 则难以将数字控制固有的时间延迟、采样保持等影响考虑进去, 从而影响最终的控制效果。本文在介绍电路硬件设计的基础上, 着重研究了数字控制变换器在离散域的建模以及校正传递函数的设计, 并详细

分析了数字控制的时间延迟对控制性能的影响。

2 硬件设计

逆变电源的硬件框图如图 1 所示, 根据电源的指标要求, DC/DC 变换器采用推挽拓扑, 整流器为全桥整流, 输出滤波电路: $L_1 = 141\mu\text{H}$, $C_1 = 470\mu\text{F}$; DC/AC 变换器采用全桥逆变电路, 输出滤波电路: $L_2 = 1.2\text{mH}$, $C_2 = 1\mu\text{F}$ 。

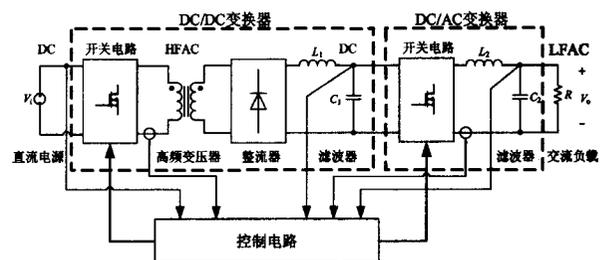


图1 两级变换逆变电源

Fig.1 Diagram of two level transform inverter

根据参考文献[3,4]可知, DC/DC 变换器和 DC/AC 变换器的“控制-输出”连续域传递函数都可以简化为:

$$G_p(s) = \frac{V_o}{D} \frac{(sR_E C_i + 1)}{1 + s \frac{L_i}{R} + s^2 L_i C_i} \quad (1)$$

其中: V_o 为变换器的输出电压; D 为占空比; R_E 为

收稿日期: 2007-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50677056)

作者简介: 王凤岩(1975-), 男, 山东籍, 博士后, 研究方向为高频开关电源;

许建平(1963-), 男, 贵州籍, 教授/博导, 从事电力电子与电力传动方向研究。

滤波电容的寄生串联电阻(ESR); R 为变换器的等效负载; L_1, C_1 分别为 L_1, C_1 或者 L_2, C_2 。

由(1)式可知该传递函数是一个含有复极点和一个零点的系统,其中复极点是由滤波电容和滤波电感的低通滤波产生的,而零点则是由滤波电容和其 ESR 引起的。通常零点的频率高于极点的位置^[5]。

数字控制电路采用德州仪器的 TMS320F2812 作为控制部分的核心,该 DSP 具有两个事件管理器,刚好可以分别对 DC/DC 变换器和 DC/AC 变换器分别进行控制。事件管理器可以将 A/D 转换、定时计数器及 PWM 输出等模块组合到一起,最大限度地节约了闭环控制的 CPU 时间,同时还可以方便地实现电路保护和通信等功能。

3 数字控制器的建模与设计

3.1 功率级的 z 域模型

开关电源模拟控制器的设计都是基于 s 域进行的,数字控制也可沿用模拟控制的设计方法,如图 2 a)所示,仍然采用 s 域的设计方法,在得到 s 域的控制函数之后再行 z 变换得到数字控制器的参数^[6,7]。图中: $G_p(s)$ 为变换器功率级传递函数; K_s 为反馈检测比例系数; K_m 为 PWM 调制比例系数; $G_c(s)$ 为设计的控制传递函数。

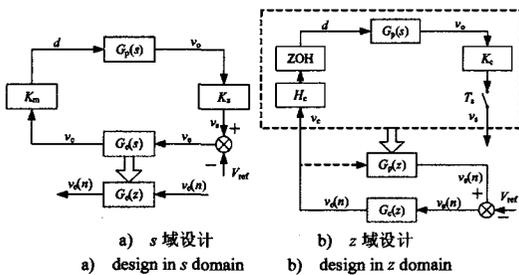


图 2 数字控制的设计框图

Fig.2 Diagram of digital control design

该方法虽然设计简便,但是数字控制的时间延迟和采样保持等影响难以考虑进去,因此我们采用直接数字建模的方法建立系统的数学模型,变换器的系统模型框图可以表示为图 2 b)所示的形式,其中: $G_p(s)$ 为功率级的连续域模型; K_d 为传感器的检测比例,包括 A/D 转换的增益; H_d 为控制器的计算延迟,包括 A/D 转换的延迟; ZOH 为 DPWM 和 A/D 转换的零阶采样保持; $G_c(z)$ 是我们需要设计的控制器。

该建模方法与图 2 a)的最大区别在于,设计中考虑了零阶采样保持 ZOH 和控制中的时间延迟 H_c 的影响,将它们与变换器的功率级模型 $G_p(s)$ 一并进行 z 变换,得到离散域模型 $G_p(z)$ 然后再在离散域进行设计,求得控制器的传递函数 $G_c(z)$ 。这样得到的模型会更精准。

在连续域中采样保持的传递函数为:

$$SH(s) = \frac{1 - e^{-sT_s}}{s} \quad (2)$$

图 2 b)中计算延迟模块 H_c 包含了由 A/D 转换的转换时间引起的延迟,以及 PWM 占空比数据更新的时间延迟,如果总的时间延迟为 T_d ,则:

$$H_c(s) = e^{-sT_d} \quad (3)$$

在直接数字设计的方法中,连续时间的功率级模型首先 ZOH 采样离散化:

$$G_p(z) = Z \left\{ \frac{1 - e^{-sT_s}}{s} \cdot H_c(s) \cdot G_p(s) \cdot K_c \right\} \quad (4)$$

设计中可以利用 matlab 实现上式的变换。一旦得到了功率级的离散域模型 $G_p(z)$ 就可以采用离散域的设计方法对数字控制器 $G_c(z)$ 进行设计了。

3.2 DC/DC 开关电源控制器设计

由式(1)可得 DC/DC 变换器的功率级传递函数为:

$$G_p(s) = \frac{794(s + 1.6 \times 10^6)}{(s^2 + 212.6s + 4.4 \times 10^7)} \quad (5)$$

若不考虑控制引起的时间延迟,即 $T_d = 0$,利用式(4)可得:

$$G_{p1}(z) = \frac{0.06(z + 0.8241)}{(z - 1)(z - 0.99)} \quad (6)$$

则利用 Matlab 的“SISOTOOL”采用自动控制的滞后超前校正方法,经过零极点设计可得校正传递函数为:

$$G_{c1}(z) = \frac{3.12(z - 0.96)(z - 0.91)}{(z - 1)(z - 0.056)} \quad (7)$$

对应的开环传递函数波特图如图 3 所示,由图可知:相位裕量为 46.9° ,穿越频率为 $2.76 \times 10^4 \text{ rad/s}$ (即 4.4KHz)。经过仿真可知相应的阶跃响应主要瞬态指标为:超调 $M_p = 24.9\%$;上升时间是 $t_r = 35\mu\text{s}$;调整时间 $t_s = 1\text{ms}$ 。

若考虑控制引起的时间延迟,有 $T_d = 0.5T_s$,则被控制对象的传递函数变为:

$$G_{p2}(z) = \frac{0.014(z + 5.71)(z + 0.17)}{z(z - 1)(z - 0.99)} \quad (8)$$

若仍采用式(7)进行补偿控制,则经过分析可知此时相位裕量变为 36.4°,如图 4 所示,相应的超调变为 $M_p = 39.5\%$,上升时间和调整时间基本没有变化。可见由于数字控制中的延迟导致系统的动态性能变差。此时如果降低低频增益(将控制器的低频零点向更低频率移动)则可以减小超调,但是代价是延长了调整时间。

若进一步有 $T_d = 2T_s$,则相位裕量仅为 4.73°,系统是不稳定的。如果调整控制补偿电路,采用式(9)所示的 3 极点 3 零点传递函数进行补偿,系统仍然可以稳定,相位裕量可以达到 45.4°,但是调整时间 $t_s = 34.5\text{ms}$,系统的阶跃响应非常慢了。因此以尽量快的速度完成控制运算是系统能够达到良好性能的保证,由于设计中采用 DSP 进行反馈控制,因此系统控制的延迟时间(包括 A/D 转换时间、算法计算时间和 DPWM 数据的更新时间)可以保证在 0.5 个开关周期以内,因此可以采用设计的 G_{c1} 进行控制。

$$G_{c2}(z) = \frac{1.70(z - 0.47)(z - 0.93)(z - 0.97)}{(z - 1)(z - 0.051)(z - 0.042)} \quad (9)$$

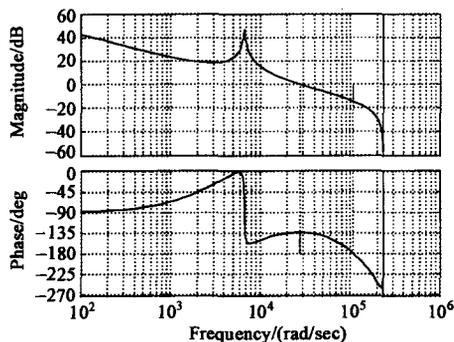


图 3 DC/DC 变换器的开环波特图

Fig.3 Open loop Bode diagram of DC/DC converter

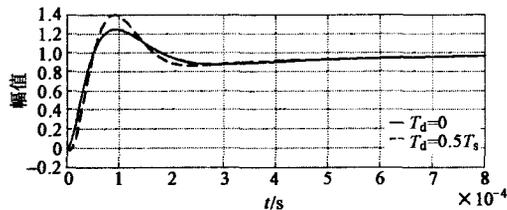


图 4 不同延迟时间输出响应波形比较

Fig.4 Transient response of different delays

3.3 DC/AC 逆变电源数字控制器设计

采用相同的方法可以对 DC/AC 的控制器进行 z 域设计。在不考虑数字控制中的时间延迟时,可以

求得功率级传递函数为 G_{p1} ,校正传递函数为 G_{c1} ,对应的开环传递函数波特图如图 5 所示,由图可知:相位裕量为 44.2°,穿越频率为 $3.19 \times 10^4 \text{ rad/s}$ (即 5.08KHz)相应的阶跃响应曲线如图 6 所示。主要瞬态指标为:超调 $M_p = 29.3\%$;上升时间是 $t_r = 29\mu\text{s}$;调整时间 $t_s = 0.63\text{ms}$ 。若考虑数字控制中存在的延迟 $T_d = 0.5T_s$,则功率级传递函数为 G_{p2} ,同样可以得到新的控制传递函数 G_{c2} ,对应的新的波特图和阶跃响应分别如图 5 和图 6 所示:由图可以看出相位裕量达到了 45.9°,但是同时带宽也变窄了,截止频率为 $2.29 \times 10^4 \text{ rad/s}$ (即 3.65KHz)比原来降低了 1.4KHz。相应的阶跃响应指标为:超调 $M_p = 19.3\%$;上升时间是 $t_r = 41.9\mu\text{s}$;调整时间 $t_s = 2.3\text{ms}$ 。可以看出为了降低超调(得到高的相位裕量),牺牲了较大的低频增益,从而延长了调整时间。

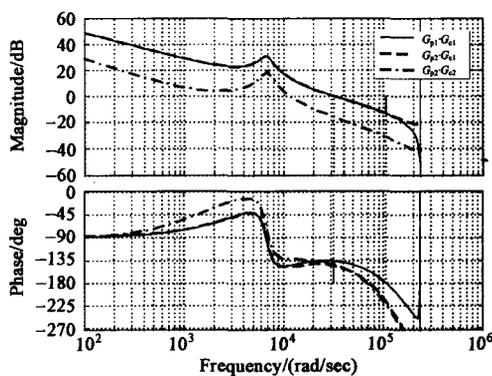


图 5 DC/AC 逆变电源开环波特图

Fig.5 Open loop Bode diagram of DC/AC inverter

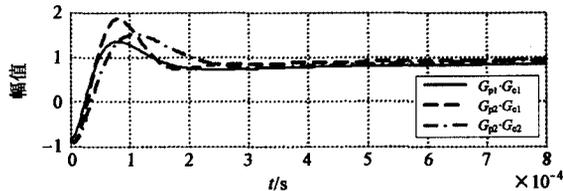


图 6 逆变电源的阶跃响应波形

Fig.6 Transient response of inverter

为了进一步验证设计的有效性,利用 matlab 对设计的电路进行时域仿真,而控制传递函数分别采用上面设计的补偿电路 G_{c1} 和 G_{c2} 。为了方便比较,将施加了扰动的输出电压减去没有施加扰动正常情况下正弦输出电压,比较采用两种不同控制方法的这种差值电压。仿真结果如图 7 所示,在 1.5ms 处增大负载施加扰动,可以看出采用 G_{c1} 补偿的超调

大于采用 G_{c2} 补偿的超调,这与前面的分析完全一致。同时由于在 400Hz 处补偿的增益是有限的,所以输出电压存在稳态误差,因此在负载发生变化后,输出电压的幅值发生了变化,即表现在图 7 在瞬态过程结束后,电压有稳定的 400Hz 波动。同时可以看出采用 G_{c2} 补偿的波动幅值大于采用 G_{c1} 补偿,由前面的分析可知这是由于 G_{c2} 的低频增益低于 G_{c1} 的低频增益造成的。

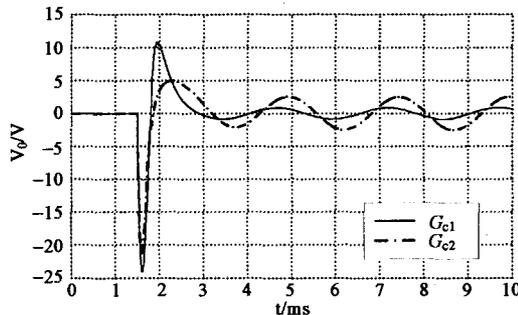


图 7 两种补偿电路下输出电压瞬态响应波形比较

Fig. 7 Transient response comparison of different compensations

4 实验研究

由于 DC/AC 变换器的反馈检测和驱动等电路的辅助电源是采用 DC/DC 变换器上变压器的多绕组输出实现的,因此控制中,在输入电压低于 22V 时,仅仅控制前级 DC/DC 变换器工作,直到输入电压达到 22V 时后级 DC/AC 变换器才开始软启动。这样可以保证 DC/AC 变换器可靠工作。实验表明在满载时输入电压在 22V ~ 32V 时,都可以输出稳定的电压波形。并且由于采用数字控制,输出电压的频率相当稳定。

为了对逆变器的负载瞬态响应进行验证,我们分别采用前面设计的控制器参数 G_{c1} 和 G_{c2} 对逆变主电路进行反馈控制,对在相同的负载冲击下输出电压的响应波形进行比较,瞬态响应波形如图 8 所示,图中 I_{oa} 为负载突变后输出电流的变化量。电压波形是 100V/格,电流波形是 1A/格,时间轴是 400 μ s/格。其中图 8 a) 为采用 G_{c1} 控制下的响应波形,而图 8 b) 为采用 G_{c2} 控制下的响应波形,通过比较可以看出采用 G_{c2} 控制的输出电压的波动幅度明显小于采用 G_{c1} 控制的响应波形,另外,通过测量可知采用 G_{c2} 控制的稳态输出电压值要低于采用 G_{c1} 控制的有效值,这一结果与前面仿真结果完全一致。

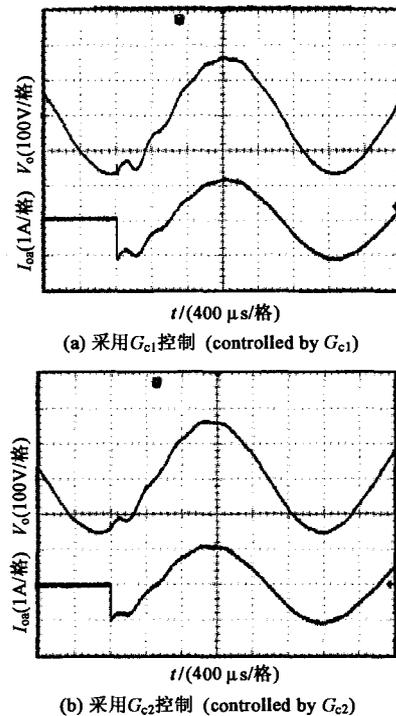


图 8 负载瞬态响应实验波形

Fig. 8 Experiment waveforms of load transient response

5 结论

本文采用单个 DSP 实现了两级 DC/AC 逆变电源的反馈控制,采用新的方法从离散域建立了 DC/DC 变换器和 DC/AC 逆变器的数学模型,该方法可以更方便地将控制中的时间延迟和采样保持等对控制回路的影响考虑进去,借助于 Matlab 的设计工具可以实现更准确的控制器的设计。时域仿真和实验结果表明采用该方法设计的控制器具有更好的稳定性和瞬态响应特性。

参考文献 (References):

- [1] Benjamin J Patella, Aleksandar Prodic, Art Zirger, et al. High-frequency digital PWM controller IC for DC-DC converters [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2003, 18(1): 438-446.
- [2] Zhengyu Lu, Zhaoming Qian, Yong Zeng, et al. Reduction of digital PWM limit ring with novel control algorithm [A]. IEEE APEC [C]. Anaheim, CA, USA, 2001. 521-524.
- [3] G F Franklin, J D Powell. Digital control of dynamic systems [M]. Addison-Wesley Publishing Company, 1998.
- [4] 熊健,史鹏飞,张凯,等 (Xiong Jian, Shi Pengfei, Zhang Kai, et al.). 基于电压微分反馈控制和重复控制的逆变电源控制技术 (Voltage-differential-feedback control plus repetitive control for PWM inverters) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2006, 25(3): 46-49.
- [5] 高军,黎辉,杨旭,等 (Gao Jun, Li Hui, Yang Xu, et al.).

基于 PID 控制和重复控制的正弦波逆变器研究(Study on sine wave inverters with PID control and repetitive control) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2002, 21(1): 1-4.

- [6] Aleksandar Prodic, Dragan Maksimovic, Robert W Erickson. Design and implementation of a digital PWM controller for a high-frequency switching DC-DC power converter [A]. IECON'2001 [C]. Denver, CO, USA, 2001. 893-898.

- [7] T W Martin, S S Ang. Digital control for switching converters [A]. ISIE'95 [C]. Athens, Greece, 1995. 480-484.

- [8] 舒为亮, 张昌盛, 段善旭, 等 (Shu Weiliang, Zhang changsheng, Duan Shanxu, Kang Yong). 逆变器 PI 双环数字控制技术研究 (Research on PI dual-loop digital control technology for inverter supply) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2005, 24(2): 52-54.

Two level inverter controlled by single DSP

WANG Feng-yan^{1,2}, ZHAO Wei-gang¹, XU Jian-ping²

(1. National EW Laboratory, CETC No.29 Research Institute, Chengdu 610036, China;

2. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The paper studied "DC/DC converter + DC/AC inverter" two level converter which is controlled by single DSP controller. The principle of the circuit is introduced. The transfer functions of DC/DC converter and DC/AC inverter are designed based on a more accurate model proposed. The influence of digital controller's control delay is analyzed and simulated. The validity of circuits and control transfer function is verified by the experiment on a 500VA 28VDC/115V 400Hz inverter prototype.

Key words: inverter; converter; digital control; DSP

(上接第 35 页, cont. from p.35)

computation and can be easily realized in DSP. Systemic analysis and experiments prove that it greatly improves the robustness of deadbeat control, and has good steady state performance and fast dynamic response. It is quite suitable for the full digital implementation of UPS.

References:

- [1] Liviu Mihalache. DSP control method of single-phase inverters for UPS applications [A]. Proc. IEEE APEC 2002 [C]. Dallas, US, 2002. 590-596.

- [2] 熊健, 周亮, 张凯, 等 (Xiong Jian, Zhou Liang, Zhang Kai, et al.). 一种高性能的单相逆变器多环控制方案 (A high precision multi-loop control strategy for single-phase PWM inverters) [J]. 电工技术学报 (Trans. China Electrotechnical Society), 2006, 21(12): 79-83.

- [3] Paolo Mattavelli. An improved deadbeat control for UPS using disturbance observers [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2005, 52(1): 206-212.

- [4] 汪孟, 刘亚东, 李方正, 等 (Wang Meng, Liu Yadong, Li Fangzheng, et al.). UPS 逆变器的渐近收敛无差拍控制 (Progressively converging deadbeat control for UPS inverter) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2007, 26(1): 47-50.

- [5] 李俊林, 熊健, 康勇 (Li Junlin, Xiongjian, Kang Yong). 逆变器数字多环控制技术研究 (Study on digital multiple-loop control technology of inverters) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2004, 23(4):

57-59.

- [6] Whitaker H P, Yamron J, Kezer A. Design of model reference adaptive control systems for aircraft [R]. Report No. R - 164, Instrumentation Lab. MIT, 1958.

- [7] 熊健, 史鹏飞, 张凯, 等 (Xiong Jian, Shi Pengfei, Zhang Kai, et al.). 基于电压微分反馈控制和重复控制的逆变器电源控制技术 (Voltage-differential-feedback control plus repetitive control for PWM inverters) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2006, 25(3): 46-49.

- [8] 梁斌, 瞿文龙 (Liang Bin, Qu Wenlong). 一种新型单相 DC/AC 逆变器的并联控制方法 (A new control method for parallel single-phase DC/AC inverter) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2006, 25(4): 58-62.

- [9] 马学军, 陈息坤, 康勇 (Ma Xuejun, Chen Xikun, Kang Yong). 一种新的基于 DSP 的高精度 UPS 锁相技术 (A novel high precision phase-locked method for UPS based on DSP) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2005, 24(4): 59-62.

- [10] 汪孟 (Wang Meng). 单相在线式 UPS 的数字控制和并联运行 (Digital control and parallel operation for single-phase on-line UPS) [D]. 北京: 清华大学 (Beijing: Tsinghua University), 2007.

- [11] Meng Wang, Fangzheng Li, Yadong Liu, et al. Distributed parallel operation of modified deadbeat controlled UPS inverters [A]. The 38th IEEE PESC [C]. Orlando, Florida, USA, 2007. 1727-1732