

# 峰值控制交错并联 Boost PFC 的设计

王山山, 柳绪丹, 胡长生\*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**功率因数校正(PFC)技术已广泛的应用于各类电力电子装置当中。为了实现功率因数校正技术在较高功率场合的应用,提出了一种基于峰值电流模式控制的交错并联 Boost PFC 变换器。首先分析了在电感电流连续模式下交错并联 Boost PFC 电路的工作原理,然后利用状态空间平均法建立了主电路的数学模型,在推导了峰值电流闭环控制传递函数的基础上详细分析了闭环控制器的参数选取。最后试制了一台 1.2 kW 交错并联 Boost PFC 样机。试验结果表明,该变换器具有良好的功率因数校正效果。

**关键词:**交错并联;功率因数校正;峰值电流控制

中图分类号:TM46

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)08-0088-04

## Design of interleaved Boost PFC converter with peak current control

WANG Shan-shan, LIU Xu-dan, HU Chang-sheng

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Power factor correction(PFC) technology has been widely applied in various types of switching power device. Aiming at realizing the application of PFC technology in high power condition, a new interleaved Boost PFC converter with peak current mode control was presented. Firstly, a deep analysis on continue current mode of operation was made. And in the modeling of the circuit, the state-space averaging technique was used. Based on the transfer function of control loop, the regulator of the circuit was also designed. At last, a prototype of interleaved Boost PFC converter rated at 1.2 kW was built. The experimental results show that the converter has favorable effectiveness of the converter.

**Key words:** interleaved; power factor correction(PFC); peak current mode control

## 0 引 言

随着电力电子技术的飞速发展,电网系统中电力电子负载急剧增加,谐波污染日益严重。功率因数校正(PFC)电路是改善电网供电质量的一种有效办法。Boost 电路因其拓扑结构简单、效率高、易于控制等特点而被广泛运用于 PFC 技术中<sup>[1-2]</sup>。

交错并联 Boost PFC 电路在较大功率容量的场合具有较强的优势<sup>[3]</sup>,其通过多个交错控制的 Boost 变换器并联,有效地实现了较高功率容量输出,避免了开关管直接并联引起的电流不均,降低了开关管的容量要求。在交错并联 Boost PFC 变换器中,由多个开关

管错时分担输入电流,提高了输入电流纹波频率,减小了输入纹波电流幅值,有利于滤波电路的设计和减小开关损耗。另一方面,交错并联 Boost PFC 变换器拓扑结构决定了其电路相对复杂,控制难度较大的缺点,同时由于拓扑中电感为独立两个,参数难以一致,容易引起电感电流不均<sup>[4]</sup>。

本研究给出一种交错并联电路的峰值控制方案。峰值控制方法简单,具有良好的线性调整率和快速的动态响应,与其他控制方式相比,其针对逐个脉冲电流控制,较易的实现了限流保护<sup>[5]</sup>。本研究结合交错并联 Boost PFC 电路的工作原理,对 CCM 峰值电流控制闭环进行设计,最后制作一台 1.2 kW 的

收稿日期:2010-01-15

作者简介:王山山(1985-),男,内蒙古通辽人,硕士研究生,主要从事新型功率因数校正技术方面的研究. E-mail: wangshen3382@gmail.com

通信联系人:胡长生,男,副教授,硕士生导师. E-mail: huc@s.zju.edu.cn

实验样机以进行验证。

## 1 交错并联电路工作状态分析

交错并联控制技术是针对工作频率相同的多个开关功率变换器单元并联场合,控制各单元功率管交错工作的一种控制策略。应用该控制策略在一个开关周期内,每个单元都只开通相同时间,时序呈有规律的交错状态。一种交错并联 PFC,如图 1 所示,由两个 Boost 单元构成,采用峰值电流模式实现交错并联控制,两个开关管的驱动信号相差半个开关周期。

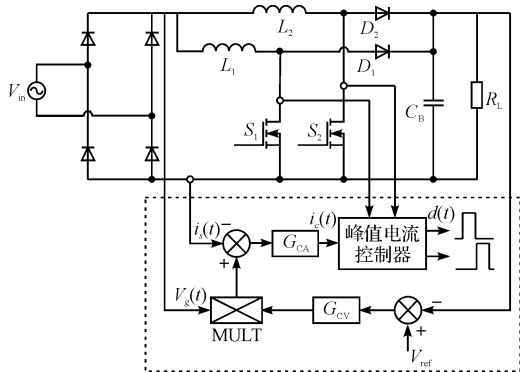


图 1 交错并联 Boost PFC 主拓扑及其控制

与传统 Boost PFC 相应,交错并联电路也可工作在电感电流断续(DCM)<sup>[6]</sup>、电感电流临界连续(CRM)模式<sup>[7]</sup>。工作在这两种模式下二极管没有反向恢复问题,但电路输入电流谐波含量较高。为获得较高的功率因数,本研究采用 CCM 模式。

开关管  $S_1$  和  $S_2$  各有开、关两种状态,在电感电流连续模式下,电路可能出现 4 种工作状态,如图 2 所示。

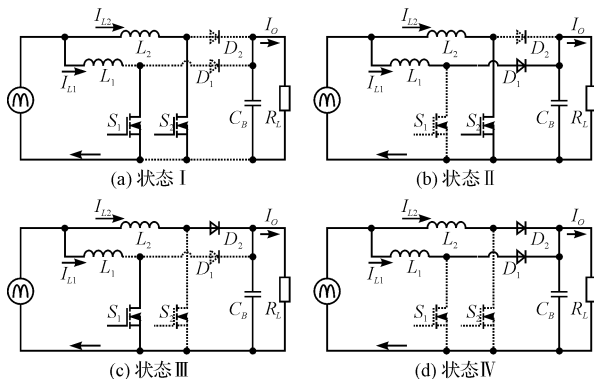


图 2 变换器在 CCM 模式下的 4 种工作状态

(1) 状态 I。开关管  $S_1$  和  $S_2$  同时开通,电感电流  $I_{L1}$ 、 $I_{L2}$  均上升,输出电容  $C_B$  释放能量。

(2) 状态 II。开关管  $S_1$  关断,  $S_2$  开通,电感电流  $I_{L1}$  下降而  $I_{L2}$  上升。

(3) 状态 III。开关管  $S_1$  开通,  $S_2$  关断,此时电感电流  $I_{L1}$  上升而  $I_{L2}$  下降。

(4) 状态 IV。开关管  $S_1$ 、 $S_2$  均关断,此时两电感电流都减小,输出电容  $C_B$  储存能量。

## 2 峰值控制环路设计

### 2.1 总体控制方案

如图 1 所示,控制部分采用双环控制结构。其中,电压外环着重于输出端电容电压的反馈和调节,电流内环则控制输入电流跟踪输入电压变化,实现输入电流波形的校正。

输入的整流电压  $v_g(t)$  和输出电压的误差放大信号相乘,与输入电流  $i_s(t)$  进行比较后,形成峰值电流基准  $i_c(t)$ ,经峰值电流控制器输出两路相位相差  $180^\circ$  的控制信号  $d(t)$ 。由于电流基准是全波整流电压的采样值与电压环误差放大器的输出乘积决定的,则能实现电感电流峰值包络线跟踪  $V_g$ ,使输入电流与输入电压同相位并接近正弦。

### 2.2 电流内环反馈控制系统设计

为了获得较高功率因数,提高系统的输出精度和动态特性,需要对电流闭环设计良好的补偿网络。整个电流闭环结构如图 3 所示。

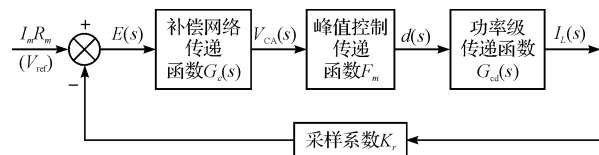


图 3 电流闭环结构

未加补偿网络  $G_c(s)$  的回路增益函数为  $G_0(s) = F_m(s) G_{cd}(s) \cdot K_r$ ,称为原始增益函数。功率级开关频率远大于工频,可根据状态平均法忽略电感电流纹波<sup>[8]</sup>,通过建立电流环功率级的小信号简化模型,求得功率级传递函数为:

$$G_{cd}(s) = \frac{i_L(s)}{d(s)} = \frac{V_o}{sL} \quad (1)$$

交错并联峰值电流控制器的电路原理如图 4 所示。经分频的两路时钟脉冲 CLK1 和 CLK2 相位相差  $180^\circ$ ,保证了 RS 触发器置位时间相差半个周期,实现交错控制。每个开关周期之初,时钟脉冲置位触发器,开关管开通,电感电流逐渐增加。当检测到经斜坡补偿后的开关电流大于基准电流  $i_c$  时,比较器反转并复位 RS 触发器,开关截止,等待定频时钟再次触发。斜坡补偿提高了峰值电流控制的稳定性。

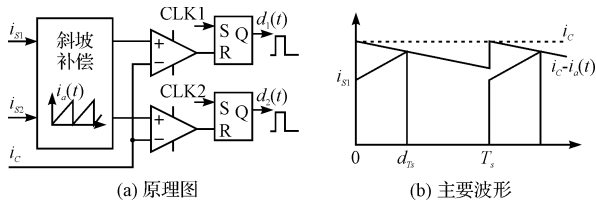


图 4 交错并联峰值控制器原理图及其主要波形

考虑了斜坡补偿的峰值电流控制传递函数为:

$$F_m(s) = \frac{d(s)}{v_{CA}(s)} = \frac{1}{M_a T_s R_f} \quad (2)$$

式中  $M_a$ —斜坡补偿电流斜率;  $T_s$ —开关周期;  $R_f$ —斜坡补偿信号转换电阻。

补偿网络需要具有较高的低频增益、较宽的中频宽度和高频时较快的下降速度,这样可以较好地跟踪参考正弦波并对开关纹波具有一定抑制能力。补偿网络及其幅频特性如图 5 所示。

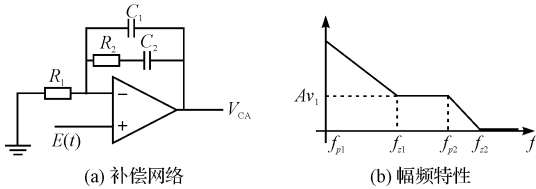


图 5 补偿网络及其幅频特性

补偿网络的传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{s^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + s(R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2) + 1}{s^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + s R_1 (C_1 + C_2)} \quad (3)$$

补偿网络的设计要求是:系统回路函数  $G_c(s) \cdot G_0(s)$  的增益交越频率  $f_g$  设定为开关频率的  $1/10 \sim 1/5$ ,回路增益函数以  $-20 \text{ dB/dec}$  斜率通过  $0 \text{ dB}$  线。为减小输出高频开关纹波,可将极点  $f_{p2}$  设定在开关频率。为满足稳定性要求,系统相位裕量选择在  $60^\circ$  左右。

### 3 峰值控制交错并联 Boost PFC 的实现

#### 3.1 控制系统的实现

控制环节采用传统的 PFC 控制芯片 UC3854 和交错并联控制芯片 UC28220 共同组成。UC3854 利用其内部电压电流环误差放大器和乘法器,产生电感电流峰值控制所需给定值,并由 CAOUT 输出。UC28220 通过外部两路电流互感器采样开关管电流,经过内部比较器,输出两路相位相差  $180^\circ$  的 PWM 控制信号。每一路的开关频率设定在  $65 \text{ kHz}$ 。

电流闭环通过设置补偿网络参数,得出了补偿后的系统回路函数频率特性,如图 6 所示。由图 6 可知

增益交越频率  $f_g = 8 \text{ kHz}$ ,相位裕量  $PM = 62^\circ$ ,满足系统稳定性要求。

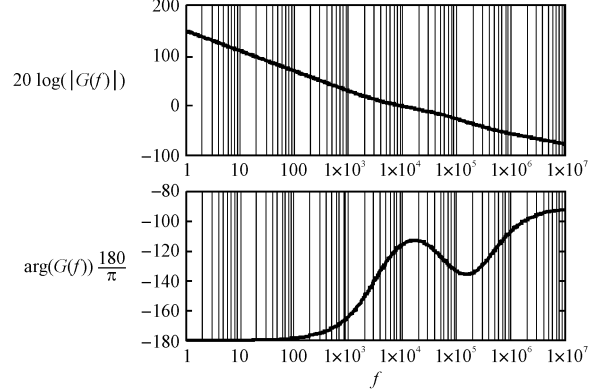


图 6 补偿后的回路函数频率特性

#### 3.2 主要元件的选取

根据功率管的电压和电流应力,留取  $1.5 \sim 2$  倍的裕量, MOSFET 选用 infineon 公司的 IPW60R099CP;为了降低二极管反向恢复所带来的损耗和强 EMI,本研究采用 infineon 公司 SiC 肖特基二极管,其型号 IDT06S60。

两电感参数相同,输入电流纹波限定在电感电流的  $10\%$  以内,由伏秒平衡的关系,可求得:

$$L \geq \frac{U_{inmin}^2 \times \eta}{10\% \times \sqrt{2} \times P_o} \times D_{max} \times T \quad (4)$$

实际电路中,取  $360 \mu\text{H}$ 。

输出滤波电容主要考虑技术指标对于保持时间以及输出低频纹波的要求:

$$C > \frac{1}{2\pi f_{line} \Delta U} \int_{\theta}^{\pi-\theta} (i_{in}(\omega t) - I_o) d\omega t \quad (5)$$

实验中本研究采用两个  $470 \mu\text{F}/450 \text{ V}$  的电容并联的结构。

## 4 实验结果

根据电路工作原理和设计过程,本研究制作了一台  $1.2 \text{ kW}$  的实验样机。交流输入电压范围为  $85 \sim 265 \text{ V}$ ,直流输出电压为  $400 \text{ V}$ ,单路开关频率为  $65 \text{ kHz}$ 。两路 MOSFET 的驱动控制信号如图 7 所示,互相错开  $180^\circ$ ,为使 MOSFET 更加可靠关断驱动电路加入了  $3 \text{ V}$  负压。 $230 \text{ V}$  输入满载工作时的输入电流波形如图 8 所示。输入电压  $230 \text{ V}$  时电路由轻载到满载的变换器效率、输入电流畸变率以及输入电流功率因数曲线如图 9 所示。可见使用了 CoolMOS 的交错并联 Boost PFC 最高效率可达到  $97.3\%$ 。稳态工作时,输入电流能够很好地跟踪输入电压形成近似正弦波,使功率因数接近 1。 $400 \text{ W}$  以上工作点,THD 均在

(下转第 102 页)

较,该算法在 PSNR 上远高于双三次算法,而且在视觉效果上也能达到与双三次算法近似的效果,同时,由于该算法的每一个处理单元之间有很好的并行性,笔者利用 GPU 对该算法进行了加速,在保证双三次算法效果的基础上提高了算法的效率,满足了图像处理的实时要求。

但该方法仍然有待改进,例如如果在图像缩放的过程中加入对图像边缘特征的描述以保证图像边缘的清晰性等,这也是图像缩放领域很值得研究的一个方向。

参考文献 (References):

[1] 赵荣椿. 数字图象处理导论[M]. 西安:西北工业大学出版社,1995.  
 [2] OUWERKERK J D. Image super-resolution survey[J]. *Image and Vision Computing*,2006,24(10):1039-1052.  
 [3] 吴国华,杨淑贞,何振华. 基于数学形态学的医学图像插值技术[J]. *机电工程*,2008,25(3).

[4] 王 森,杨克俭. 基于双线性插值的图像缩放算法的研究与实现[J]. *自动化技术与应用*,2008,27(7):44-45.  
 [5] LEHMANN T M, CÖNNER C, SPITER K. Survey: interpolation methods in medical image processing [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*,1999,18(11):1049-1075.  
 [6] DODGSON N A. Quadratic interpolation for image resampling [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*,1997,6(9):1322-1326.  
 [7] SCHAFFER R W, RABINER L R. A digital signal processing approach to interpolation[J]. *Proceeding of IEEE*,1973,61:692-702.  
 [8] 王国瑾,汪国昭,郑建民. 计算机辅助几何设计[M]. 北京:高等教育出版社,2001.  
 [9] HEARN D, BAKER M P. 计算机图形学[M]. 蔡士杰,等译. 北京:电子工业出版社,2005:574-575.  
 [10] HEARN D, BAKER M P. 数字图像处理[M]. 2版. 阮秋琦,阮宇智,译. 北京:电子工业出版社,2007:334-335.

[编辑:李 辉]

(上接第 90 页)

5% 以下,满足了 IEC61000-3-2 CLASS D 谐波标准。

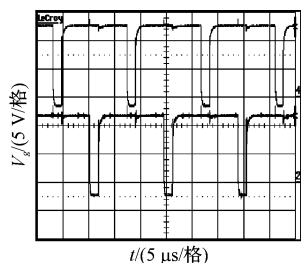


图 7 驱动波形

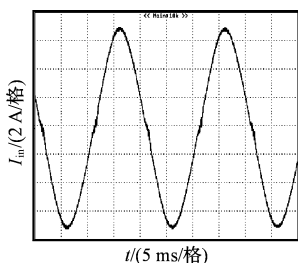
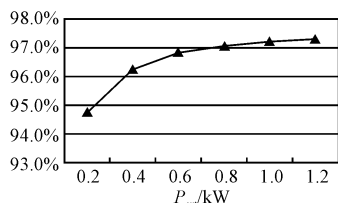
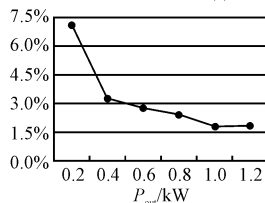


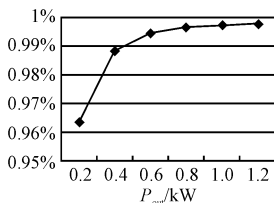
图 8 输入电流波形



(a) 变换器效率曲线



(b) 输入电流THD



(c) 输入电流PF

图 9 不同输入功率下的各曲线

5 结束语

本研究从提高交错并联 BoostPFC 控制效果出发,

通过分析交错并联电路的工作特性,提出了交错并联峰值控制方式,并对电流闭环进行了分析;给出了关键参数的设计方法,并研制了试验样机。实验结果表明该 PFC 电路具有控制简便,功率因数高等优点。

参考文献 (References):

[1] 林渭勋. 现代电力电子技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2006.  
 [2] 李晓明,吕征宇. 基于 DSP 的单相 Boost 型数字 PFC 控制技术[J]. *机电工程*,2008,25(1):108-110.  
 [3] MIWA B A, OTTEN D M, SCHLECHT M F. High efficiency power factor correction using interleaving techniques [C]//Proceedings of APEC'92,1992:557-558.  
 [4] PINHEIRO J R, GRUNDLING H A, VIDOR D L R, et al. Control strategy of an interleaved boost power factor correction converter [C]//Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99. 30th Annual IEEE,1999:137-142.  
 [5] 何 亮,方 宇,李 吉,等. 峰值电流控制 DC/DC 变换器的恒值限流方法[J]. *电工技术学报*,2006(10):86-89.  
 [6] 奚轶芳,钱照明,杨水涛,等. 光伏发电系统交错并联 BOOST 的研究[J]. *机电工程*,2008,25(10):49-51.  
 [7] TSAI J R, WU T F, CHEN Y M, et al. Interleaving Control Schemes for Critical-Mode Boost PFC [C]//Power Electronics Specialists Conference,2007:2905-2911.  
 [8] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

[编辑:张 翔]