

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2020.0006.005

# 基于占空比分配的交错并联 Boost PFC 仿真研究\*

刘德武, 陈 潇

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232000)

**摘 要:**传统交错并联 Boost PFC 电路的平均电流控制法基于均流控制,但实际应用中无法确保元器件的参数一致,无法实现均流控制;针对上述问题,提出了占空比分配法实现交错并联 Boost PFC 的均流,该方法将总电感电流平均值的 1/2 与各相电感电流平均值进行比较,根据比较后的结果确定各相的占空比;通过对电路各元件参数的计算,实现了 400 V/200 W 交错并联 PFC 电源的设计;最后,利用 MATLAB 进行仿真验证,仿真结果表明,所提出的占空比分配法能够实现输入功率因数高和两路电感均流。

**关键词:**交错并联;均流控制;占空比分配;仿真模型

中图分类号:TM64

文献标志码:A

文章编号:1672-058X(2020)06-0026-06

## 0 引 言

电力电子设备的广泛应用给电网带来的波形畸变、功率因数降低等问题也越来越严重<sup>[1]</sup>。提高功率因数,进行谐波抑制成为现阶段研究的热点和重点,其中交错并联功率因数校正(PFC)电路得到了较多的应用<sup>[2-3]</sup>。交错并联功率因数校正电路的传统控制算法是平均电流法<sup>[4]</sup>,但平均电流法所需要的反馈电流信号是总的输入/输出电流,经过闭环控制后得到一个脉冲,经过分频电路分别控制两个开关管,但实际两相驱动信号的占空比是相同的,这种模式下系统能够实现输入电压、电流同相,降低输入电流纹波,减少开关管的电流应力,但均流效果不明显,即对于每一相的电流无法独立控制<sup>[5-6]</sup>。为此,本文提出了占空比分配法实现双通道电感均流,最后通过 Matlab/Simulink 软件仿真,

仿真结果显示占空比分配控制法能达到两路均流的效果,对实际电路有参考价值。

## 1 变换器总体设计

### 1.1 工作原理

交错并联 Boost PFC 变换器原理如图 1 所示,主电路采用两个单相 Boost 变换器并联,搭配控制回路实现两相电感均匀分担输入电流,减小开关管的电流应力。根据开关管的导通状态不同会存在 4 种工作状态:

(1) 开关  $S_1$  和  $S_2$  均导通时,电源向两电感充电,输出电容为负载提供能量;

(2) 开关  $S_1$  导通, $S_2$  关断时,电源给电感  $L_1$  充电,而电感  $L_2$  为负载提供能量,同时给输出电容充电;

(3) 开关  $S_1$  关断, $S_2$  导通时,电源给电感  $L_2$  充

收稿日期:2019-11-12;修回日期:2019-12-23.

\* 基金项目:国家自然科学基金资助(61873004).

作者简介:刘德武(1995—),男,安徽霍邱人,硕士研究生,从事电力电子与电力传动研究.

电,电感  $L_1$  为负载及输出电容提供能量;

(4) 开关  $S_1$  和  $S_2$  均保持关断时,两路电感并联同时为负载提供能量。

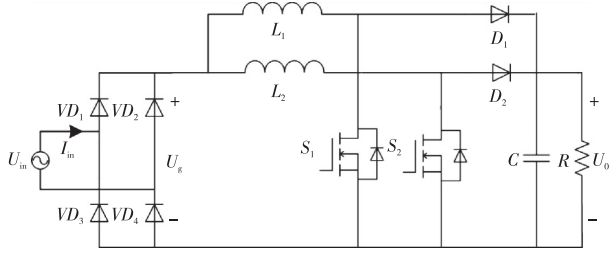


图 1 电路原理图

Fig. 1 The circuit principle diagram

## 1.2 电感电流与占空比的关系

为了分析简便,假设所有器件都是理想的,输出电容足够大,开关的频率远大于输出电压的频率。令输入侧交流电压的表达式为

$$U_{in}(t) = U_m \sin \omega t \quad (1)$$

其中,  $U_m$  为输入电压的幅值;  $\omega$  为角频率,则输入电压整流后为

$$U_g = U_m |\sin \omega t| \quad (2)$$

一个开关周期内的两个电感电流峰值分别为

$$I_{1-pk}(t) = \frac{U_g D_{1a} T_s}{L_1} = \frac{U_m |\sin \omega t|}{L_1} D_{1a} T_s \quad (3)$$

$$I_{2-pk}(t) = \frac{U_g D_{2a} T_s}{L_2} = \frac{U_m |\sin \omega t|}{L_2} D_{2a} T_s \quad (4)$$

其中,  $D_{1a}$ 、 $D_{2a}$  为电感  $L_1$  和  $L_2$  的占空比;  $T_s$  为开关周期。

已知一个周期内电感两端满足伏秒平衡。可得:

$$D_{1a} = \frac{U_g}{U_o - U_g} D_{1b} \quad (5)$$

$$D_{2a} = \frac{U_g}{U_o - U_g} D_{2b} \quad (6)$$

其中,  $U_o$  为输出电压;  $D_{1b}$ 、 $D_{2b}$  为电感电流下降到零所对应的占空比。

根据式(3)和式(5)、式(4)和式(6)可得一个开关周期内的电感电流平均值:

$$I_{1-av}(t) = \frac{1}{2} I_{1-pk}(t) (D_{1a} + D_{1b}) =$$

$$\frac{1}{2} \frac{U_m D_{1a}^2}{L_1 f_s} \frac{|\sin \omega t|}{1 - \frac{U_m}{U_o} |\sin \omega t|} \quad (7)$$

$$I_{2-av}(t) = \frac{1}{2} I_{2-pk}(t) (D_{2a} + D_{2b}) = \frac{1}{2} \frac{U_m D_{2a}^2}{L_2 f_s} \frac{|\sin \omega t|}{1 - \frac{U_m}{U_o} |\sin \omega t|} \quad (8)$$

其中,  $f_s$  为开关频率,总的电感平均电流为两路电感平均电流之和。

## 2 占空比分配控制策略

传统平均电流双闭环控制理论是基于均流控制的,但实际情况下并不能保证元件参数一致,且输出电压的波动会造成电流参考值的波动导致输入电流中谐波成分增加而降低输入功率因数。因此,设计提出了占空比分配法,其核心的方法是电感电流与占空比之间的关系如式(7)、式(8)所示,当电感电流发生改变时,可以控制占空比的大小以达到两相电感电流均流的目的,控制电路如图 2 所示。具体的工作原理如下:

(1) 通过对输出电压的  $U_o$  的采样,将采样数据与电压给定  $U_{ref}$  做比较,比较后的电压差值经过一个 PI 控制器得到总的电流给定  $I_{ref}$ ,再将采样的总的电感电流  $I_L$  与总的电流给定做比较,比较后的电流差值经过一个 PI 控制器得到总的误差信号  $U_c$ ,如果将此误差信号与三角波做比较输出占空比再经分频电路直接驱动开关管的话,两相的驱动占空比是相同的,这样并不能使每相电流完全相同。

(2) 占空比分配法是将两相电感电流  $I_1$ 、 $I_2$  与总电感电流的  $I_L/2$  做比较,比较后的差值再经过比例放大器得到误差信号  $U_b$ ,然后将误差信号  $U_c$  与  $U_b$  作比较,比较后的差值再与三角波进行比较最终得到每相占空比  $D_1$  和  $D_2$ ,因此使得在总的低压侧电流保持不变的前提下,每相电流能够自动调节占空比以实现两路电感均流的效果。

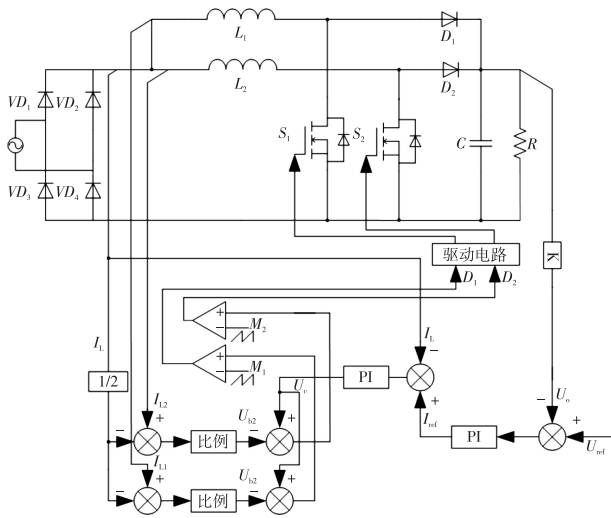


图 2 占空比分配器

Fig. 2 Duty cycle distributor

### 3 硬件电路设计

#### 3.1 电路的技术参数

表 1 为电路技术参数表。

表 1 电路技术参数

Table 1 Circuit technical parameter

技术参数	数值
输入电压	220 V
输出电压	400 V(DC)
电网频率	50 Hz
额定功率	400 W
功率因数	>0.99
开关频率	50 kHz
电源效率	>95%

#### 3.2 电感的设计

交错并联 Boost PFC 电路的输入电流为各相电感电流之和。输入电流的纹波会随着并联相数增加而减小。当两相交错并联时,对于连续模式下多通道交错并联 Boost PFC 变换器,电感设计公式为

$$L_{CCM} = \frac{n \times U_0 \times \eta \min(V_{in})}{4 \times f_s \times k_{ripple} \times P_0} \quad (9)$$

其中,  $f_s$  为开关频率,  $k_{ripple}$  为电流纹波参数,为了达到电感体积最小,通常情况下电流纹波参数至少要

在 0.4 以上。经计算本课题选用电感值为 2.6 mH。

#### 3.3 输出电容的设计

输出电容值的选取主要决定于输出直流电压,所允许的输出电压纹波值大小、开关频率、输出功率、维持时间等因素。一般情况下的输出电容计算公式为

$$C_0 = \frac{2P_0 t}{\max V_0^2 - \min V_0^2} \quad (10)$$

其中,  $\max V_0$  和  $\min V_0$  为输出电压纹波最大值和最小值,维持时间为 10 ms,额定输出功率 400 W,输出直流电压为 400 V,纹波上下限幅值为 3%,经计算选用电容值为 450  $\mu$ F。

#### 3.4 功率管和二极管的设计

选择功率管和二极管时,需要考虑耐压和过流能力并留有一定的裕量,最终选取超快恢复二极管 F8L60,耐压为 800 V,耐流 8 A,功率管选用 Infineon 公司的 SPW11N60C3 系列开关管,耐压 600 V,耐流 11 A。

### 4 仿真及波形分析

利用 Simulink 搭建交错并联 BoostPFC 电源的仿真电路,图 3 为交错并联电感电流的波形,由图 3(a)可以看出,单个电感支路的电流波形纹波分别为 0.076 和 0.075,但经过交错并联后,总电流的纹波降为 0.000 28。图 3(b)为电感  $L_1$  串 0.01  $\Omega$ 、电感  $L_2$  串 0.1  $\Omega$  后的电感电流波形,两相电感电流相等达到均流效果。图 4 显示的是两相电感分别串 0.01  $\Omega$  和 0.1  $\Omega$  后的占空比波形,由波形可以看出,当两相电流不同时,控制回路会迅速改变两相占空比大小以保证两相均流。图 5 为输入电压和电流波形,由图 5 可知,电压波形和电流波形基本同相。输出电压波形如图 6 所示,输出电压稳定在 400 V。如图 7 所示两路电感未串电阻时输入电流的总谐波失真 THD 为 5.74%。如图 8 所示为两路电感分别串 0.01  $\Omega$  和 0.1  $\Omega$  后的输入电流的总谐波失真 THD 为 5.44%。

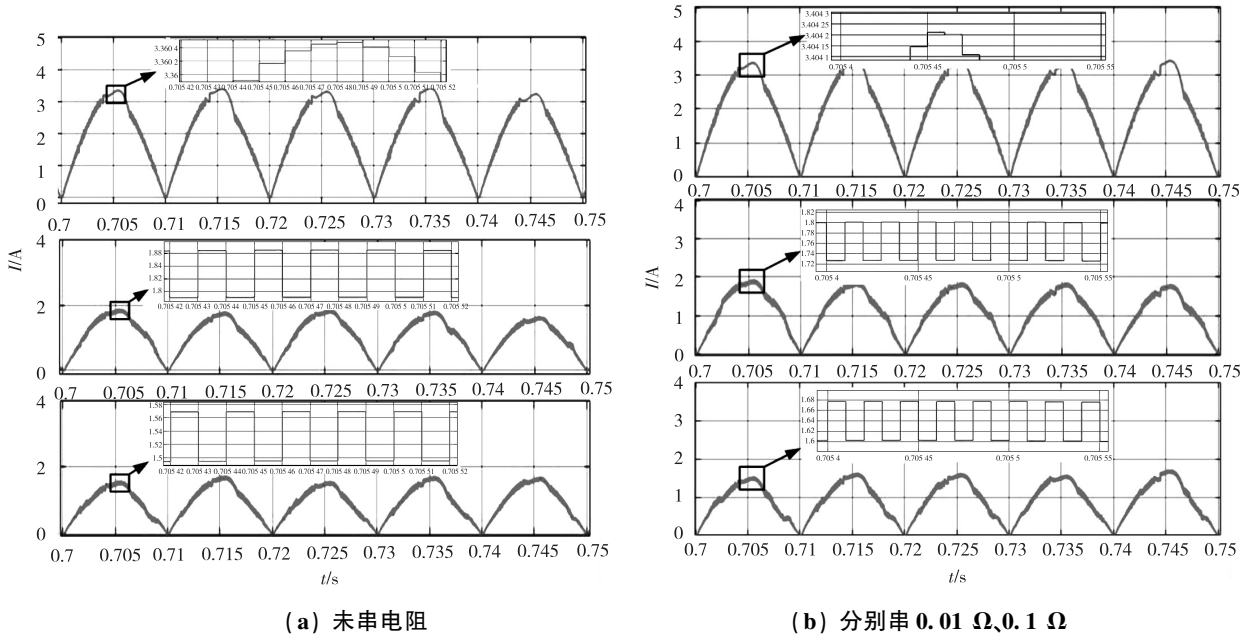


图 3 电感电流波形

Fig. 3 Inductive current waveform

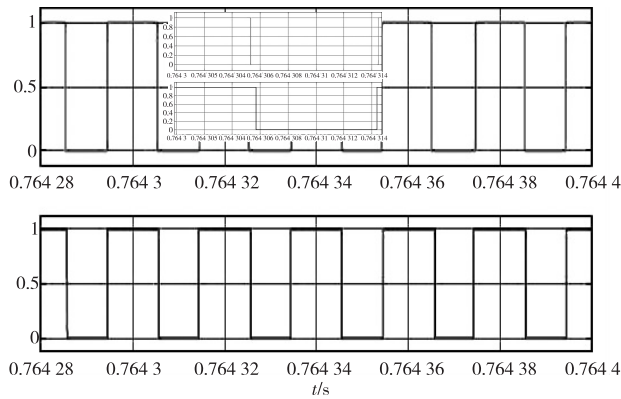


图 4 分别串  $0.01 \Omega$ 、 $0.1 \Omega$  电阻后的占空比

Fig. 4 Duty cycle after series connection of  $0.01 \Omega$  and  $0.1 \Omega$  resistance respectively

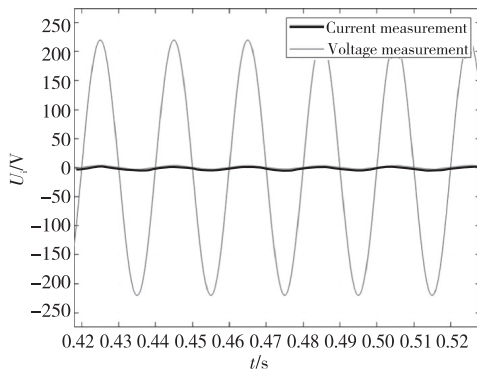


图 5 输入电压电流波形

Fig. 5 Input voltage and current waveform

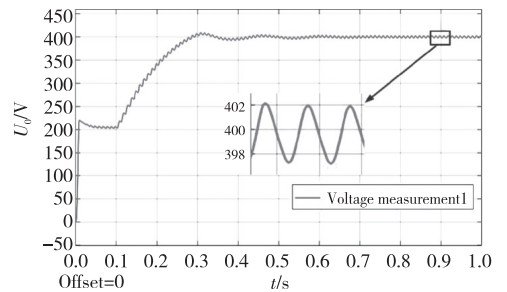


图 6 输出电压波形

Fig. 6 Output voltage waveform

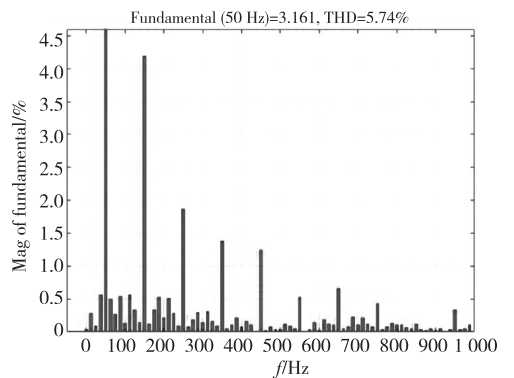


图 7 输入电流谐波分析

Fig. 7 Input current harmonic analysis

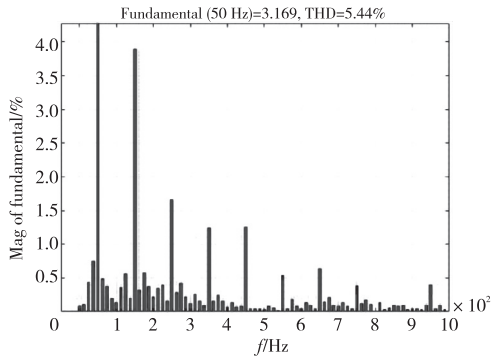


图 8 电感串电阻后输入电流谐波分析

Fig. 8 Harmonic analysis of input current after inductor series resistance

## 5 结束语

简述了功率因数校正技术及其控制原理,利用占空比分配方式实现数字 PFC 双闭环控制。根据技术指标计算电路的主要参数,并建立系统仿真模型,在 MATLAB/Simulink 环境下进行了仿真研究及量化分析。仿真结果表明,输入侧 PF 为 0.999 9、输入电流的谐波失真 THD 为 5.74%,有良好的功率因数校正效果,验证了其控制理论的可行性。同时,证明本文提出的占空比分配法能够有效地提高输入电流功率因数,实现两相电感均流的效果。

### 参考文献 (References):

- [1] 王兆安,刘进军. 谐波抑制和无功补偿[M]. 北京:机械工业出版社,2000:36—38  
WANG Z A, LIU J J. Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2000:36—38 (in Chinese)
- [2] 王斌泽. 多通道交错并联 Boost 功率因数校正技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012  
WANG B Z. Research on Multi-channel Interleaved Parallel Boost Power Factor Correction Technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 (in Chinese)
- [3] 陈文明,黄如海,谢少军. 交错并联 Boost PFC 变换器设计[J]. 电源学报,2011(4):63—67

- CHEN W M, HUANG R H, XIE S J. Design of Interleaved Parallel Boost PFC Converter [J]. Power Journal, 2011(4):63—67 (in Chinese)
- [4] 杨荣德. 交错并联功率因数校正电路及其数字控制研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2014  
YANG R D. Research on Interleaving and Parallel PFC Circuit and Its Digital Control [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014 (in Chinese)
- [5] 霍现旭,张伟,项添春,等. 直流微网系统用交错并联双向直流变换器控制方法[J/OL]. 电力系统及其自动化学报:1—7[2019-11-08]  
HUO X X, ZHANG W, XIANG T C, et al. Control Method of Interleaving and Parallel Bidirectional DC Converter for DC Microgrid System [J/OL]. Journal of Power System and Automation: 1—7[2019-11-08] (in Chinese)
- [6] 杨刚. 基于 DSP 的交错并联双向 DC/DC 变换器研究[D]. 成都:西南交通大学,2015  
YANG G. Research on Interleaved Parallel Bidirectional DC/DC Converter Based on DSP[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015 (in Chinese)
- [7] 贲洪奇,张继红. 开关电源中的有源功率因数校正技术[M]. 北京:机械工业出版社,2010  
BEN H Q, ZHANG J H. Active Power Factor Correction Technology in Switching Power Supply [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010 (in Chinese)
- [8] 杨潮晖. Boost-PFC 电路拓扑和数字控制的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010  
YANG C H. Research on Boost PFC Circuit Topology and Digital Control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010 (in Chinese)
- [9] 赵琴,金爱娟,纪晨焯,等. 多相交错并联 Boost 功率因数校正器的研究[J]. 电子科技,2016,29(5):67—70  
ZHAO Q, JIN A J, JI C Y, et al. Study on the Multi-phase Interleaved Parallel Boost Power Factor Corrector [J]. Electronic Technology, 2016, 29(5):67—70 (in Chinese)
- [10] 李文渝. Boost 型功率因数校正电路的设计与研究

- [D]. 杭州:浙江大学,2017  
LI W Y. Design and Research of Boost PFC Circuit[D].  
Hangzhou: Zhejiang University, 2017(in Chinese)
- 化,2018,40(3):23—25+77  
MA Z. Research and Design of Interleaved Parallel PFC  
Power Supply[J]. Electrical Automation, 2018,40(3):  
23—25+77(in Chinese)
- [11] 马昭. 交错并联 PFC 电源研究与设计[J]. 电气自动

## Research on Interleaved Parallel Boost PFC Simulation Based on Duty Cycle Assignment

**LIU De-wu, CHEN Xiao**

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of  
Science and Technology, Anhui Huainan 232000, China)

**Abstract:** The average current control method of the traditional interleaved parallel Boost PFC circuit is based on current sharing control, but in practical applications, it is impossible to ensure that the parameters of the components are consistent, and the current sharing control cannot be realized. In view of the above problems, a duty ratio method is proposed to realize the current sharing of interleaved parallel boost PFC. In this method,  $1/2$  of the average total inductance current is compared with the average inductance current of each phase, and the duty ratio of each phase is determined according to the comparison results. The design of 400V / 200W interleaved parallel PFC power supply is realized by calculating the parameters of each component of the circuit. Finally, Matlab is used to verify the simulation. The simulation results show that the proposed method can achieve high input power factor and current sharing of two inductors.

**Key words:** interleaving parallel; current sharing control; duty cycle distribution; simulation model

责任编辑:罗姗姗

---

引用本文/Cite this paper:

刘德武,陈潇. 基于占空比分配的交错并联 Boost PFC 仿真研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2020,37(6):  
26—31

LIU D W, LIANG Z, CHEN X, et al. Research on Interleaved Parallel Boost PFC Simulation Based on Duty Cycle Assignment[J].  
Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2020, 37(6): 26—31