

文章编号:1005-0523(2011)02-0024-05

# 预测平均电流控制 PFC Boost 变换电路

叶满园

(华东交通大学电子与电气工程学院,南昌 330013)

**摘要:**介绍了基于PFC Boost变换电路的预测平均电流控制方法,通过推导得出了预测平均电流控制策略的控制方程式。并采用Matlab仿真软件对预测平均电流控制型PFC Boost变换器进行了建模和仿真。仿真结果表明,预测平均电流控制型PFC Boost变换器具有控制电路简单可靠、输入功率因数高、抗干扰能力强、电流谐波失真小等优点,预测平均电流控制策略为有源功率因数校正提供了一种新颖的、简单可行的控制方法。

**关键词:**功率因数控制;预测平均电流控制;计算机仿真

**中图分类号:**TM464

**文献标志码:**A

随着变频器、开关电源等各种电力电子设备在工业领域中的应用日益广泛,电网的电流谐波问题越来越严重,谐波污染给系统本身和周围的电磁环境带来了一系列的危害。因此功率因数校正(power factor correction, PFC)技术已成为电力电子技术领域一个新的研究热点。

目前,常用的功率因数校正技术主要包括:电流峰值控制、电流滞环控制、平均电流控制、单周期控制、基于无差拍和预测的混合控制等<sup>[1-3]</sup>。文献[4]对平均电流控制PFC Boost变换电路进行了研究,但平均电流控制系统中因为采用了乘法器,这会因为乘法器的非线性失真而增加输入电流的谐波含量;文献[5]对单周期控制PFC Boost变换电路进行了建模与仿真研究,但是单周期控制需要采用电压外环和电流内环的双环控制,控制电路比较复杂。本文在分析比较了各种控制方法的基础上,给出了一种新颖的预测平均电流控制(predictive averaged current control, PACC)策略,该策略采用了预测电流控制的思想 and 单周期控制策略的原理对PFC Boost变换电路进行控制。该策略消除了传统控制方法中的乘法器,并且无需检测输入电压,无需内环电流PI调节器。具有实现简单、抗干扰能力强、响应速度快、输入电流谐波成分低、适应输入电压和负载变化范围宽等优点<sup>[6-8]</sup>。同时,仿真结果证明了该方法是正确可行的。

## 1 预测平均电流控制原理

根据功率因数的定义可知,要实现功率因数校正,必须满足式(1),即

$$f(i_m) = \frac{V_{in}}{R_e} \quad (1)$$

式中:  $V_{in}$  为整流后电压;  $R_e$  为变换器的输入端等效电阻;  $f(i_m)$  为电感电流函数,采用不同的控制方法,  $f(i_m)$  的表达式有所不同。

控制目标是在每个开关周期内,使电感上的电流的平均值跟电感电流函数  $f(i_m)$  的平均值相同<sup>[6]</sup>。由于开关频率比电网频率大的多,我们假设在一个开关周期内输入和输出电压都为常数。故在Boost电路连续导通时,能够在开关导通期间预测开关关断期间电感电流的斜率,于是我们可以得到预测开关调制控制

收稿日期:2010-01-16

基金项目:江西省教育厅科技项目(GJJ09147);华东交通大学科研基金项目(09DQ02)

作者简介:叶满园(1978—),男,副教授,硕士,研究方向为电力电子技术及应用。

方程表达式<sup>[6]</sup>。

$$f(i_{in}) = \frac{V_{in}}{R_c} + \frac{V_o - V_{in}}{L}(1-D)T_s \quad (2)$$

式中:  $V_o$  负载上的电压;  $D$  为占空比;  $T_s$  为采样周期;  $L$  为电感。

由图1(a)可见,在每个开关周期内,电感电流的平均值  $i_{in}$  为一锯齿波形。当PFC Boost变换器正常工作时,开关器件的开关频率至少在20~30 kHz以上,因此每个开关周期的时间都很短。在很短的开关周期内,我们假设输入和输出电压都为常数,因此在一个开关周期内  $f(i_{in})$  的大小也保持不变,如图1(b)中的横实线所示。由图1(b)还可以看出在一个开关周期内,实际的锯齿型电感电流  $i_{in}$  的平均值如1(b)中的横虚线所示,大小为实际电感电流  $i_{in}$  的二分之一。根据电感上的电流的平均值跟电感电流函数  $f(i_{in})$  的平均值相同的控制目标<sup>[6]</sup>,为了使得两者相等。

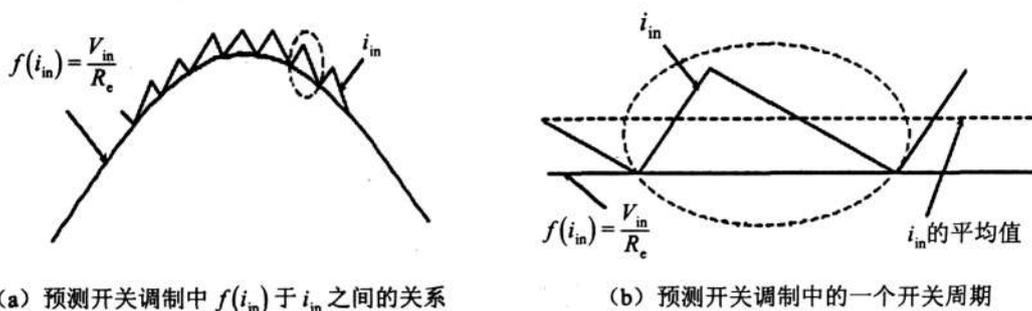


图1 预测开关调制中电感电流  $i_{in}$  平均值与  $f(i_{in})$  之间的关系

Fig.1 Relationship of  $i_{in}$  and  $f(i_{in})$  of PACC

由图1(b)可以看出,只要把  $i_{in}$  的平均值所对应的横虚线向下平移,使其与电感电流函数  $f(i_{in})$  的平均值所对应的横实线重合,那么就能满足电感上的电流的平均值跟电感电流函数  $f(i_{in})$  的平均值相同的控制目标。因此只要把  $f(i_{in})$  的控制方程式(2)修正为表达式(3),也就实现了电感  $i_{in}$  平均值向下平移与  $f(i_{in})$  平均值相同的控制目标。

$$f(i_{in}) = \frac{V_{in}}{R_c} + \frac{1}{2} \frac{V_o - V_{in}}{L}(1-D)T_s \quad (3)$$

式(3)就是本文采用的一种新型控制策略,即预测平均电流控制技术的控制方程。

当Boost变换器在连续导通模式下,我们可以得到

$$V_{in} = (1-D)V_o \quad (4)$$

将式(4)带入到式(3)可得预测平均电流控制策略的载波函数表达式

$$I_c(t) = \frac{V_c(t)}{R_s} = I_{ref}(1-D) + \frac{1}{2} \frac{V_o T_s}{L} D(1-D) = I_{ref} \left(1 - \frac{t}{T_s}\right) + \frac{1}{2} \frac{V_o T_s}{L} \frac{t}{T_s} \left(1 - \frac{t}{T_s}\right) \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (4)$$

根据上述分析,可以得出预测平均电流控制的单相PFC Boost功率因数校正器的控制框图,如图2所示。

## 2 仿真研究

为了验证预测平均电流PFC Boost变换器控制方法的正确性,本文利用Matlab仿真软件下的Simulink和Simpowersystems工具箱对该电路进行了建模和仿真研究,仿真模型图及子模型封装图如图3和图4所示。

仿真参数为:交流电源  $V_s=220\text{ V}$ ;交流电源频率为  $50\text{ Hz}$ ;IGBT的开关频率为  $50\text{ kHz}$ ;输出电压为  $400\text{ V}$ ;负载电阻  $R=450\ \Omega$ ;平波电感  $L_1=2.5\text{ mH}$ ;输出滤波电容  $C=470\ \mu\text{F}$ 。检测输出电压的分压电阻  $R_1=1\ 580\ \text{k}\Omega$ ;  $R_2=20\ \text{k}\Omega$ ;电流采样电阻  $R_s=0.02\ \Omega$ 。系统仿真步长  $h=10\ \mu\text{s}$ ,仿真算法采用4阶的龙格库塔算法。图5给出了交流侧电压、电流的仿真波形;图6给出了输入电流的频谱含量波形图;图7给出了直流侧电压  $V_{dc}$ 的电压波形图。

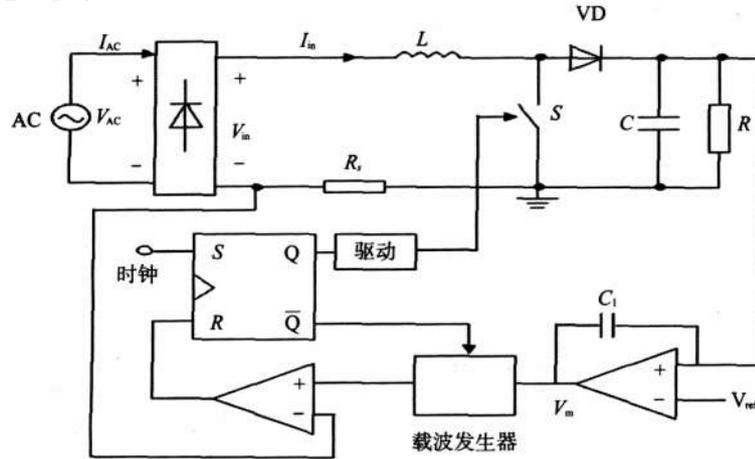


图2 预测平均电流 PFC Boost 变换器控制框图  
Fig.2 The schematic diagram of the PFC Boost with PACC

图3的仿真模型图中主要包括 Simpowersystems 工具箱中的交流电源模块、通用桥式电路模块(Universal Bridge)、开关器件 IGBT 模块(IGBT)、二极管模块(Diode)、电压和电流检测模块等。其中通用桥模块是一个封装好的单项二极管桥式整流电路,Powergui 模块是用来对系统输出电流做FFT分析模型。

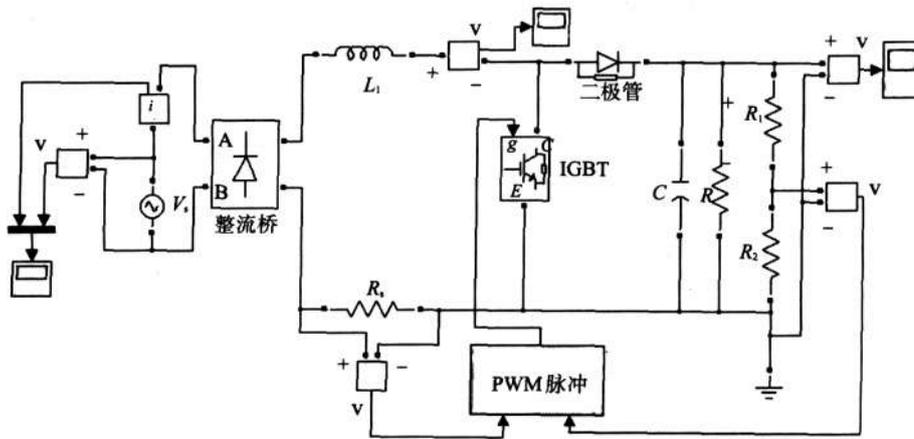


图3 仿真模型图  
Fig.3 Simulation model

图4给出了图3中的脉冲生成电路的内部封装电路。由图4可见,  $R_s$ 上的检测电压  $V_{o2}$ 与电压参考值  $V_{ref}$ 进行比较,然后经过PI调节器产生调制信号与三角载波进行调制。三角载波发生器(Carry wave Generage)的输出信号与检测电压  $V_{o1}$ 进行比较,比较结果作为S-R触发器(S-R Flip-Flop)R端的控制信号,S-R触发器的S端信号有时钟模块(Clock)提供。S-R触发器的Q端输出信号送给开关器件IGBT做为触发脉冲信号,而S-R触发器  $\bar{Q}$ 端的信号送给载波发射器做为载波生成的控制信号。

图5给出了基于预测平均电流控制策略下的PFC Boost变换器交流侧输入电压和电流的仿真波形图,

从图5中可以看出,电压和电流能够实现同相位,这就说明了预测平均电流控制策略能够使得PFC Boost变换器实现单位功率因数运行。另外由电流波形可以看出,交流侧输入电流基本上接近于正弦,这说明了采用预测平均电流控制策略能够使得交流侧输入电流的谐波失真(THD)很小,从而减少对电网的污染。

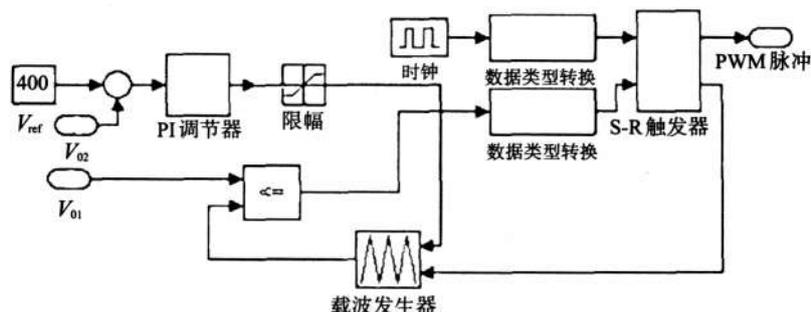


图4 脉冲发生电路(PWM pulse)模块内部封装图  
Fig.4 Mask figure of PWM pulse subsystem

图6给出了基于预测平均电流控制策略下的PFC Boost变换器在稳态时的直流侧电压 $V_{dc}$ 的仿真波形,由图6看见,系统稳定时的直流侧电压 $V_{dc}$ 能够保持跟给定参考电压相同,基本稳定在400V左右。

图7给出了基于预测平均电流控制策略下的PFC Boost变换器电感电流的频谱分析图,图7(a)为电感电流波形,图7(b)为电感电流的频谱图。从图7可以看出,系统稳定运行时的电感电流的谐波失真(THD=3.46%)很小,完全满足电网对并网电流THD小于5%的国际标准。

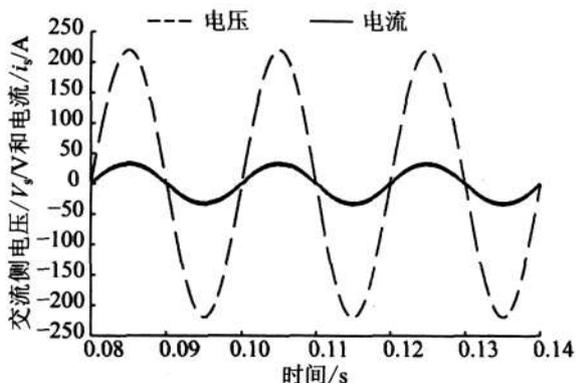


图5 输入电压和电流仿真波形  
Fig.5 Simulation waveforms of input voltage and current

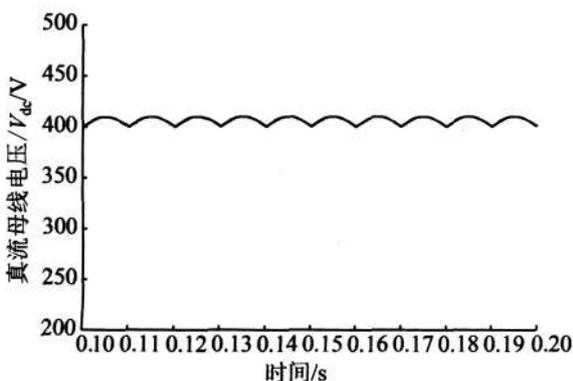
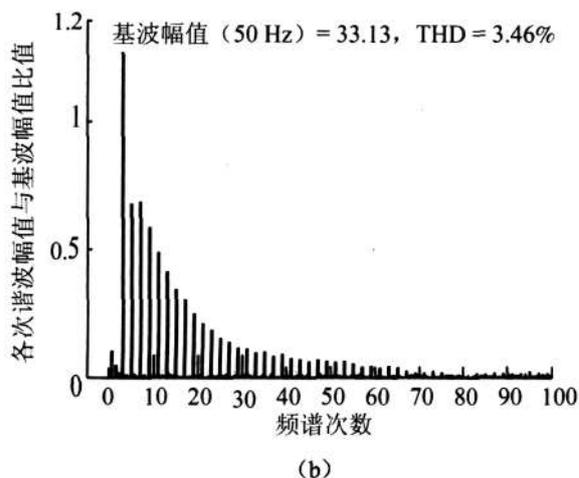
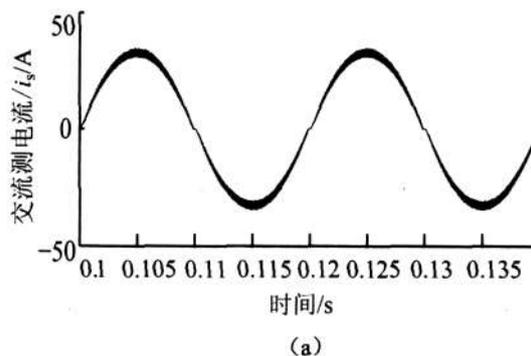


图6 直流侧电压 $V_{dc}$ 仿真波形  
Fig.6 Simulation waveform of  $V_{dc}$

图7 电感电流的频谱分析图  
Fig.7 The frequency spectrum of inductance current

### 3 结论

本文介绍了一种新颖的预测平均电流 PFC Boost 变换器控制策略,对其控制原理进行了详细分析,通过仿真研究表明,采用预测平均电流控制的 PFC Boost 变换器具有控制电路简单可靠、输入功率因数高、电流谐波失真小、抗干扰能力强等优点,为有源功率因数校正提供了一种简单可行的控制方法。

#### 参考文献:

- [1] KEYUE M, SEMDLEY, SLOBOAN C. One-cycle control of switching converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(6): 625-633.
- [2] 于蓉蓉,魏学业,吴小进,等. 一种改进型预测电流控制算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 100-107.
- [3] 肖文勋,张波,丘东元. 改进平均电流自动均流法及其在 Boost 变换器并联系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 64-69.
- [4] 曾庆虹,杨时杰. 基于平均电流控制的有源功率因数校正技术[J]. 郑州大学学报:工学版, 2006, 24(1): 72-74.
- [5] 浦锡锋,王宏华. 基于 MATLAB 的单周期控制 PFC Boost 变换电路建模与仿真[J]. 机械制造与自动化, 2007, 36(6): 145-147.
- [6] 胡红琼. 预测平均电流控制的单相有源功率因数校正变换器的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2007.
- [7] JOSÉ RODRÍGUEZ, JORGE PONTT, CÉSAR A, et al. Predictive current control of a voltage source inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2007, 54(1): 495-503.
- [8] ATHALYE P, MAKSIMOVIE D, ERICKSON R. Variable frequency predictive digital current mode control[J]. IEEE Power Electronics Letters, 2004, 2(4): 113-116.

## Predicting PFC Boost Converter with Average Current Control

Ye Manyuan

(School of Electronic and Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Based on predicting PFC Boost converter with average current control, the paper concludes control strategies equation of predicting average current control. A model and simulation of predicting Boost converter with average current control PFC is conducted by using Matlab simulation software. Simulation results show that predicting PFC Boost converter with average current control has the advantages of simple and reliable control circuit, high input power factor, anti-interference ability, and small current harmonic distortion. Predicting PFC Boost converter with average current control provides a new, simple and feasible control method.

**Key words:** power factor correction / PFC; predicting average current control; computer simulation