

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2020.0004.002

# 基于平均电流控制的升压式 PFC 研究\*

高俊岭, 张东, 李登魁, 阚聪

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** Boost 功率因数校正 (Power Factor Correction, PFC) 变换器广泛存在于各种开关电源当中以提高对电能的利用率, 为进一步优化 Boost PFC 变换器的性能, 在平均电流控制方式的基础上加入了占空比前馈控制环节; 首先介绍了 Boost PFC 变换器的工作原理以及平均电流控制方式的控制原理, 然后对电感与输出电容的计算作出分析, 再在 MATLAB/SIMULINK 中搭建加入占空比前馈控制后的电路模型并进行仿真实验, 最后对仿真结果进行分析; 结果表明: 加入占空比前馈控制后系统的功率因数有所提高, 在一定程度上降低了输入电流的总谐波畸变率, 且增加了系统的稳定性。

**关键词:** 功率因数校正; 平均电流控制; 占空比前馈; MATLAB/SIMULINK 仿真

**中图分类号:** TM46      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-058X(2020)04-0009-05

## 0 引言

得益于近些年来电力电子技术的迅速发展, 开关电源在日常生活当中也变得越来越常见。由于开关电源属于非线性装置, 在连接电网时会使输入电流波形发生一定程度的畸变, 形成谐波电流, 影响电能质量<sup>[1-3]</sup>, 除此之外, 非线性装置也能够影响到系统的功率因数, 所以, 非线性装置的应用往往不能够取得令人满意的效果。而功率因数校正 (PFC) 技术的出现则有效地改善了上述情况, 技术不仅可以大幅度地减少谐波电流, 减轻非线性装置对电能质量的影响, 还可以有效提高系统的功率因数, 使用电装置的输入电流和电网电压同步<sup>[4-5]</sup>。

Boost PFC 变换器结构简单、效率高、产生的电流谐波比较小且性能稳定, Boost PFC 变换器应用地最为广泛<sup>[6-8]</sup>, 且近年来各国学者对 Boost 型变换器的研究热度最高。平均电流控制频率稳定、无需

斜波补偿和控制回路<sup>[9-10]</sup>, 因此, 决定借助平均电流控制技术来实现输入电流与输入电压的同相位。

## 1 Boost PFC 变换器设计

### 1.1 功率因数定义

功率因数为有功功率  $P$  与视在功率  $S$  的比值, 即:

$$PF = \frac{P}{S} \quad (1)$$

由于总谐波畸变率 (THD) 的存在, 致使:

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1+THD^2}} \cos\theta = \gamma \cos\theta \quad (2)$$

其中  $\gamma$  为波形畸变因数,  $\cos\theta$  为移相因数。由式(2)可知: 提高移相因数 (使  $\cos\theta = 1$ ) 和降低输入电流总谐波畸变率两种方法都可以有效提高系统的功率因数。

### 1.2 Boost PFC 变换器的工作原理

Boost PFC 变换器的主电路结构见图 1。

收稿日期: 2019-09-30; 修回日期: 2019-11-25.

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (U1610120).

作者简介: 高俊岭 (1966—), 女, 安徽淮南人, 副教授, 硕士, 从事计算机控制技术、电力电子与电力传动研究.

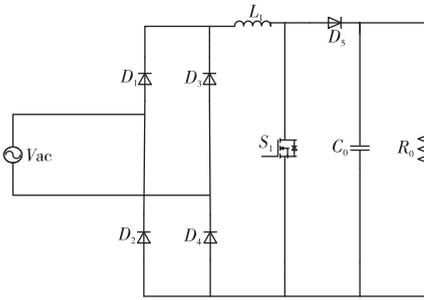


图 1 Boost PFC 变换器的主电路

Fig. 1 Main circuit of Boost PFC converter

在交流电正半周期, MOSFET 管  $S_1$  导通, 电流通过二极管  $D_1$ 、电感  $L_1$  和二极管  $D_4$  形成回路, 电流流路径为  $V_{ac} \rightarrow D_1 \rightarrow L_1 \rightarrow S_1 \rightarrow D_4 \rightarrow V_{ac}$ 。在该过程中, 电感  $L_1$  储存电能, 电感中的电流开始增加, 此时负载所消耗的能量为前一阶段中输出电容  $C_o$  所储存的能量; 在交流电负半周期, MOSFET 管  $S_1$  关断, 电流通过二极管  $D_3$ 、电感  $L_1$ 、负载和二极管  $D_2$  形成回路, 电流流路径为  $V_{ac} \rightarrow D_3 \rightarrow L_1 \rightarrow D_5 \rightarrow R_o \rightarrow D_2 \rightarrow V_{ac}$ 。此时不再单单由电源负责给负载提供能量, 电感  $L_1$  之前储存的电能也会转移到负载侧, 电感电流随之下降<sup>[1-14]</sup>, 从而实现两者共同给负载供电。且输出电容  $C_o$  开始储存能量。

### 1.3 电路设计及参数计算

(1) 电感设计。电路的最大占空比为

$$D_p = 1 - \frac{V_{in_{min}}}{V_o} \quad (3)$$

其中,  $V_{in_{min}}$  为输入电压最小值。

根据能量守恒定律, 可以得出输入电感的最大峰值电流为:

$$I_{L(pk)} = \frac{\sqrt{2}P_o}{V_{in_{min}}} \quad (4)$$

式(4)中  $P_o$  为输出功率。

为了达到最大限度减小电感电流纹波的目的, 按照电流纹波大小小于 20% 最大输入电流的原则选取, 即

$$\Delta I_L = 0.2 I_{L(pk)} \quad (5)$$

升压电感值为

$$I_{L(min)} = \frac{V_{in_{min}} D_p}{f_s \Delta I_L} \quad (6)$$

式(6)中  $f_s$  为开关管频率。

(2) 输出电容设计。当选择输出电容时, 重点考虑输出电压纹波, 一般要求输出电压纹波峰峰值 ( $V_{pp}$ ) 不高于输出电压的 5%, 电容的计算公式如下所示:

$$C_o > \frac{I_o}{2\pi f_{IN} V_{PP}} \quad (7)$$

式(7)中  $f_{IN}$  为电网频率 50 Hz,  $I_o$  为输出电流有效值。

当选择输出电容时, 还需考虑输出维持时间  $t_{hold}$ 。通常在 15 ~ 50 ms 内选取  $t_{hold}$ 。则有:

$$C_o > \frac{2P_o t_{hold}}{U_o^2 - U_{hold}^2} \quad (8)$$

其中,  $U_{hold}$  为保持时间内允许的最小 APFC 输出电压。

输出电容的选取要大于式(7)和式(8)中的电容最大值。

## 2 控制策略

近年来, PFC 技术在降低输入电流的总谐波畸变率和提高系统的功率因数方面取得了不错的成绩。平均电流控制方式由电压环和电流环两部分共同构成, 为双闭环控制策略, 此种控制方式可以较好地提升 PFC 系统的性能<sup>[15]</sup>。平均电流控制方式原理图如图 2 所示。

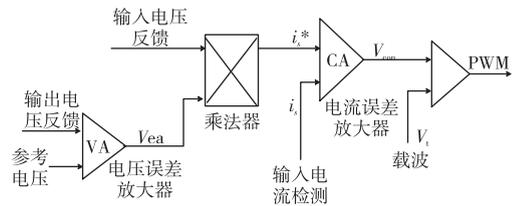
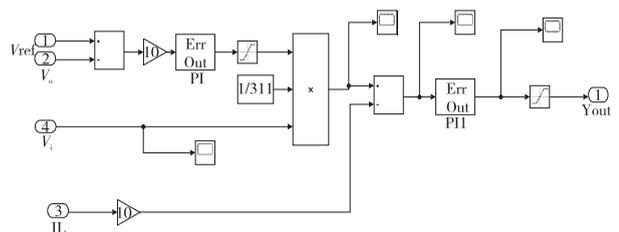


图 2 平均电流控制方式原理图

Fig. 2 The schematic diagram of average current control mode

平均电流控制方式如下所示: 输出电压与基准参考电压经电压误差放大器后得  $V_{ea}$  信号,  $V_{ea}$  信号与输入电压经乘法器后得基准参考电流  $i_s^*$ ,  $i_s^*$  与输入电流  $i_s$  经电流误差放大器后得  $V_{con}$ ,  $V_{con}$  与载波  $V_t$  比较后得 PWM 信号。

搭建平均电流控制方式模型如图 3 所示:

图 3 未加占空比前馈控制的平均电流控制方式模型  
Fig. 3 Average current control model without duty ratio feedforward control

由 Boost APFC 的工作原理可得,每一个开关周期对应的开关导通时间是由输入输出电压共同决定的,根据电感的伏秒平衡可以得出占空比的表达式为

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_o} \quad (9)$$

其中,  $V_{in}$  为输入电压,  $V_o$  为输出电压。

在平均电流控制方式的基础上加入占空比前馈 ( $V_o - V_{in}$ )/ $V_o$ 。设置占空比前馈控制,可以加快控制器的响应速度,减小控制超调,增加控制系统的稳定性。

搭建加入占空比前馈控制后的平均电流控制方式的模型如图 4 所示。

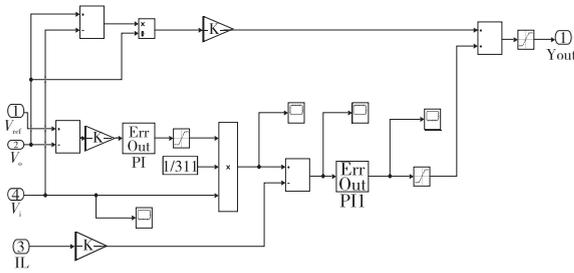


图 4 加入占空比前馈控制的平均电流控制方式模型

Fig. 4 Average current control model with duty ratio feedforward control

### 3 Boost PFC 电路仿真

基于前文对 PFC 电路工作原理及控制策略的分析,在 Matlab/Simulink 中搭建电路模型。设计参数如下:输入电压有效值为 220 V,频率为 50 Hz,开关管频率为 20 kHz,基准参考电压  $u_o^*$  为 400 V;负载电阻  $R=40 \Omega$ ,升压电感  $L=850 \mu\text{H}$ ,输出电容  $C=400 \mu\text{F}$ ,仿真时间设为 1 s,其他默认参数。PFC 仿真电路模型如图 5 所示。

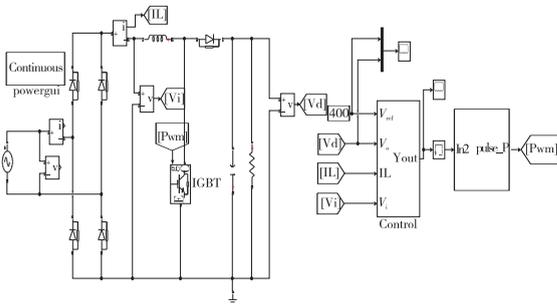
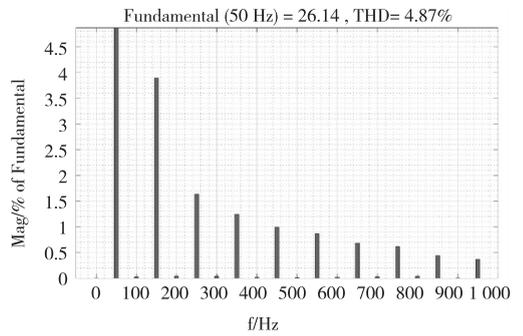


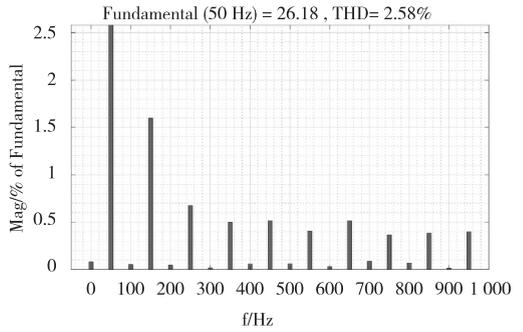
图 5 PFC 仿真电路模型

Fig. 5 PFC simulation circuit model

输入电流的频谱图如图 6 所示。



(a) 未加占空比前馈控制时输入电流的频谱图



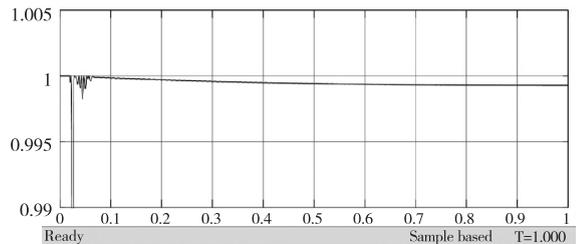
(b) 加入占空比前馈控制后输入电流的频谱图

图 6 输入电流频谱图

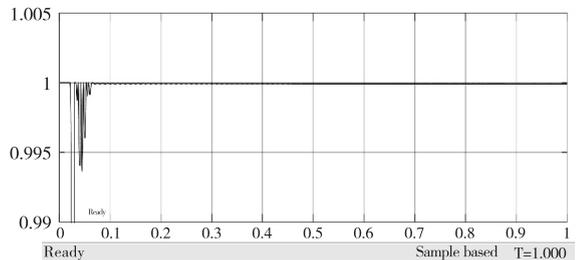
Fig. 6 Input current spectrum

由图 6 可知,加入占空比前馈控制后的输入电流总谐波畸变率由 4.87% 降低到 2.58%。输入电流的 THD 有所降低。

系统功率因数波形图如图 7 所示。



(a) 未加占空比前馈控制时系统功率因数波形图



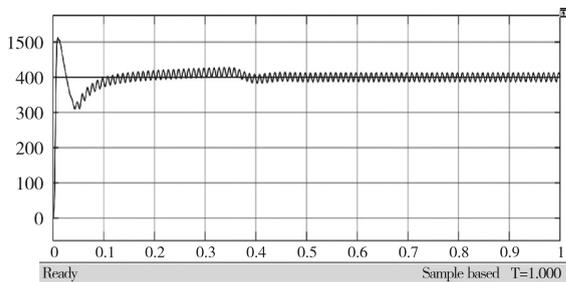
(b) 加入占空比前馈控制时系统功率因数波形图

图 7 系统的功率因数波形图

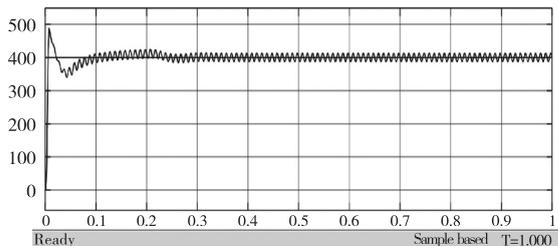
Fig. 7 Power factor waveform of the system

由图 7 可知,加入占空比前馈控制后系统在运行到 0.05 s 左右时,系统的功率因数便非常接近 1 且可以保持稳定,系统的功率因数有所提高。

系统的输出电压波形图如图 8 所示。



(a) 未加占空比前馈控制时输出电压波形



(b) 加入占空比前馈控制后输出电压波形

图 8 系统输出电压波形图

Fig. 8 Output voltage waveform of the system

由图 8 可知,未加入占空比前馈控制时,系统的输出电压波形在系统开始运行时的波动较大且在 0.4 s 左右才可以稳定在 400 V;而加入占空比前馈控制后,系统的输出电压波形在系统开始运行时的波动较小且在 0.25 s 左右就可以稳定在 400 V。系统的稳定性有所上升。

## 4 结 论

在平均电流控制方式的基础上加入了占空比前馈控制,在 MATLAB/SIMULINK 中搭建仿真模型并进行仿真实验。仿真结果表明,加入占空比前馈控制的系统的输入电流 THD 更低,系统的功率因数更高,且输出电压波形更加稳定,PFC 系统性能得到了优化。

### 参考文献(References):

- [1] 樊立萍,冯翔.基于模糊 PI 的 Boost PFC 变换器的控制改进[J].电测与仪表,2019(2):1—5  
FAN L P, FENG X. Control Improvement of Boost PFC Converter Based on Fuzzy PI [J]. Electrical Measurement and Instrument, 2019(2): 1—5 (in Chinese)
- [2] 谭令其,朱曦萌,张宝栋.Boost PFC 变换器输入电流非线性复合控制策略[J].广东电力,2019,32(1):118—124  
TAN L Q, ZHU X M, ZHANG B D. Boost PFC Converter Input Current Nonlinear Composite Control Strategy [J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32 (1):

118—124 (in Chinese)

- [3] 刘瑞.有源功率因数校正技术在工作电路中的实现[J].中国新技术新产品,2016,24:38—39  
LIU R. Realization of Active Power Factor Correction in Working Circuits [J]. New Technologies and Products of China, 2016, 24: 38—39 (in Chinese)
- [4] 唐淳淳,余粟,黄运.基于平均电流控制的交错并联 Boost PFC 变换器设计[J].化工自动化及仪表,2019,46(7):557—561  
TANG C C, YU S, HUANG Y. Design of Staggered Parallel Boost PFC Converter Based on Average Current Control [J]. Chemical Automation and Instrumentation, 2019, 46 (7): 557—561 (in Chinese)
- [5] 邹颖,关维国,张震.图腾柱无桥 PFC 输入电压检测与仿真研究[J].辽宁工业大学学报(自然科学版),2019,39(1):25—28  
ZOU Y, GUAN W G, ZHANG Z. Input Voltage Detection and Simulation of Bridgeless PFC with Totem Column [J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 39 (1): 25—28 (in Chinese)
- [6] 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 Staggered Parallel Boost PFC Converter [J]. Journal of Power Supply, 2011 (4): 63—67 (in Chinese)
- [7] 张旬,林志贤,姚剑敏,等.基于 GaN 的图腾柱 PFC 电流过零点问题的研究[J].微电子学,2019,49(4):502—507  
ZHANG X, LIN Z X, YAO J M, et al. Research on Zero-crossing Point of PFC Current of Totem Column Based on GaN [J]. Microelectronics, 2019, 49 (4): 502—507 (in Chinese)
- [8] 刘秋花,林琼斌,苏先进.应用于车载充电机的高效率交错并联 PFC 设计[J].福州大学学报(自然科学版),2018,46(6):846—852  
LIU Q H, LIN Q B, SU X J. High Efficiency Interleaved Parallel PFC Design for Vehicle Charger [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2018, 46 (6): 846—852 (in Chinese)
- [9] 马鹏飞.基于 L4981A 的平均电流控制单相 Boost PFC 设计[J].工业技术创新,2018,5(3):48—51  
MA P F. Design of Single-phase Boost PFC Based on Average Current Control of L4981A [J]. Industrial Technological Innovation, 2018, 5 (3): 48—51 (in Chinese)
- [10] 李伟锋,朱菁,纪志刚,等.一种谐波优化的 APFC 电路分析[J].电气传动,2018,48(4):29—32

- LI W F, ZHU J, JI Z G, et al. An APFC Circuit Analysis for Harmonic Optimization [J]. *Electrical Drive*, 2018, 48 (4): 29—32 (in Chinese)
- [11] 赵臣凯, 吴新科. MOSFET 反向恢复特性对临界导通模式图腾柱 Boost PFC 的影响[J]. *机电工程*, 2018, 35 (9): 981—985
- ZHAO C K, WU X K. The Influence of Reverse Recovery Characteristics of MOSFET on Boost PFC of Totem Pole of Critical Conduction Mode [J]. *Electromechanical Engineering*, 2018, 35 (9): 981—985 (in Chinese)
- [12] 姚瑞, 邓武. 一种图腾柱 PFC 的控制方法及 Simulink 仿真[J]. *大连交通大学学报*, 2017, 38 (6): 111—114
- YAO R, DENG W. A Totem Column PFC Control Method and Simulink Simulation [J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2017, 38 (6): 111—114 (in Chinese)
- [13] 刘桂花, 刘永光, 王卫. 无桥 Boost PFC 技术的研究[J]. *电子器件*, 2007 (5): 1918—1921
- LIU G H, LIU Y G, WANG W. Research on Bridgeless Boost PFC Technology [J]. *Electronic Devices*, 2007 (5): 1918—1921 (in Chinese)
- [14] 罗俊, 蒋军. 一种高功率因数宽电压范围输出的 AC-DC 电源设计[J]. *陕西理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 34 (4): 28—33
- LUO J, JIANG J. Design of a High Power Factor Wide Voltage Range AC-DC Power Source [J]. *Journal of Shaanxi Polytechnic University (Natural Science Edition)*, 2018, 34 (4): 28—33 (in Chinese)
- [15] 方飞, 薛峰, 杜晓婷. 单相 Boost 型 APFC 电路研究[J]. *滁州学院学报*, 2018, 20 (5): 37—40
- FANG F, XUE F, DU X T. Single-phase Boost APFC Circuit Research [J]. *Journal of Chuzhou University*, 2018, 20 (5): 37—40 (in Chinese)

## Research on Boost PFC Based on Average Current Control

GAO Jun-ling, ZHANG Dong, LI Deng-kui, KAN Cong

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Anhui Huainan 232001, China)

**Abstract:** Boost power factor correction (PFC) converters are widely used in various switching power supply to improve the utilization of power. In order to further optimize the performance of Boost PFC converters, duty cycle feedforward control is added on the basis of average current control mode. Firstly, the working principle of Boost PFC converter and the control principle of average current control mode are introduced. Then the calculation of inductance and output capacitance is analyzed. Then the circuit model with duty cycle feedforward control is built in MATLAB/SIMULINK and the simulation experiment is carried out. Finally, the simulation results are analyzed. The results show that the power factor of the system is improved by adding duty ratio feedforward control, which reduces the total harmonic distortion rate of the input current to a certain extent, and which increases the stability of the system.

**Key words:** power factor correction; average current control; duty cycle feedforward; MATLAB/SIMULINK simulation

责任编辑: 田 静

引用本文/Cite this paper:

高俊岭, 张东, 李登魁, 等. 基于平均电流控制的升压式 PFC 的研究[J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2020, 37 (4): 9—13

GAO J L, ZHANG D, LI D K, et al. Research on Boost PFC Based on Average Current Control [J]. *Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition)*, 2020, 37 (4): 9—13