

PFC 变换器输入电流过零畸变校正*

徐 顺 刚

(重庆师范大学 物理与工程学院,重庆 400047)

摘要 功率因数校正(PFC)变换器普遍存在输入电流在输入电压过零点附近发生畸变的现象。现分析了PFC变换器输入电流在输入电压过零点附近产生畸变原因的基础上,针对PFC变换器的输入电流超前于输入电压,从而导功率因数不为1和输入电流过零畸变的问题,提出了一种在输入电压过零点,根据输入电流实测值对PFC变换器的给定电压信号初始相位进行实时调整的数字控制方法,从而达到改善变换器输入电流过零畸变和提高功率因素的目的。通过仿真分析验证,该控制方法有效,特别是在400Hz输入电压时该方法取得了特别好的效果。

关键词 功率因数校正 过零畸变 相位差 数字控制

中图分类号:TM401+.1

文献标识码:A

文章编号:1672-6693(2010)03-0073-04

随着“绿色电源”观念的深入,为了抑制谐波及降低电磁污染,功率因数校正(PFC)技术正成为电力电子技术研究的重要领域。在高性价比的CPU和DSP不断涌现的今天,数字控制在功率因数校正技术领域的应用越来越广泛。与模拟控制相比,数字控制不仅具有控制简单,性能稳定,成本低廉等优点,而且通过软件编程,可以实现不同的控制功能,具有很大的灵活性,DSP也因此功率因数校正电路中获得了广泛的应用^[1-5]。

平均电流控制是目前广泛应用的PFC控制方法^[6],它通过控制Boost PFC开关变换器的平均输入电流,使其成为与输入电压同相位的正弦波,从而实现单位功率因数。但在输入电压过零点附近,由于PFC变换器的电感电流上升率很小,电感电流很难跟踪上基准电流^[7];此外,在负载很轻时,电感电流工作于断续状态,变换器的电流环路增益和带宽很小,电感电流更难跟踪上基准电流^[8],从而使输入电流在输入电压过零时发生畸变,特别是在电网频率较高的应用场合,输入电流过零畸变更加明显。对于航天航空应用场合,采用400 Hz交流电源供电,此时,平均电流控制PFC很难满足RTCAD0-160D标准。因此,分析并研究输入电流的过零畸变现象,具有十分重要的意义。文献[9]提出了采用三电平Boost变换器来减小过零畸变的方法,该方法需要对两个输出电容进行均压,控制较复杂;文献

[10]提出了一种采用占空比前馈控制环来减小过零畸变的方法,该方法需要设计低通滤波器来保证系统的稳定性,设计较复杂,且控制效果不明显。

针对Boost PFC变换器输入电流的过零畸变现象,本文提出了根据输入电压过零点处所检测的输入电流值来修正参考输入电压信号的初相角,从而改善PFC输入电流过零畸变的数字控制方法。仿真研究结果表明,本文所提出的数字控制策略可以有效地减弱输入电流过零畸变的现象,特别是在400 Hz的航空电网应用中具有很好的效果。

1 输入电流过零畸变分析

图1所示为采用平均电流控制的单相Boost PFC变换器,假设电网输入电压 $v_{in}(t) = V_m \sin(\omega t)$,其中 V_m 为输入电压幅值, ω 为输入电压角频率。则Boost变换器的输入电压 v_i 为

$$v_i(t) = \text{sign}(\sin(\omega t)) \cdot V_m \sin(\omega t)$$

理想的变换器输入电流 i_L 为

$$i_L(t) = G_e \cdot v_i(t)$$

其中 G_e 为Boost变换器的等效输入导纳, I_m 为输入电流幅值。

根据图2所示的Boost变换器等效模型,开关管S两端的电压为

$$\dot{V}_s = \dot{V}_i(1 - j\omega LG_e) \quad (1)$$

对于Boost变换器有 $\omega LG_e \ll 1$,因此式(1)可等

* 收稿日期 2009-03-02 修回日期 2009-04-30

资助项目 国家自然科学基金(No. 50677056)

作者简介 徐顺刚,男,讲师,博士研究生,研究方向为大功率开关变化器、电力电子与电力传动。

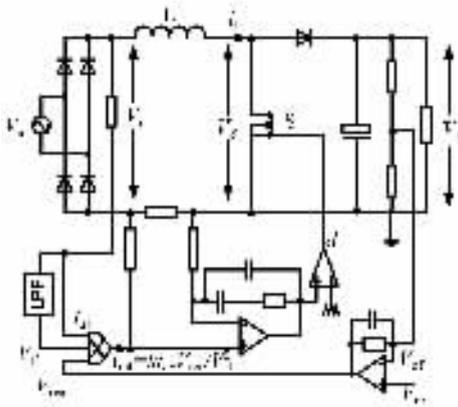


图 1 采用平均电流控制的 Boost PFC 变换器

价为

$$\begin{cases} v_s(t) \approx \text{sign}(\sin(\omega t)) \cdot V_s \sin(\omega(t - LG_c)) \\ V_s = V_m \sqrt{1 + (\omega LG_c)^2} \approx V_m \end{cases} \quad (2)$$

由(2)式可以看出 v_s 为延时了 LG_c 时间的整流正弦波,其幅值稍大于输入电压幅值,且在电网输入电压过零点处不连续,并且在电网输入电压过零处为负值,如图 2 中虚线所示。由于实际应用中 v_s 不可能为负值,故在电感电流跟踪上参考电流之前 v_s 一直维持为零值,如图 2 中粗实线所示。因此,在 PFC 变换器中输入电流存在严重的过零畸变。

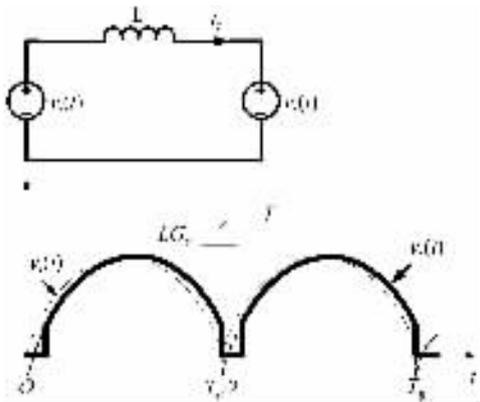


图 2 Boost PFC 变换器等效模型及主要工作波形

2 输入电流过零畸变的校正

在传统的平均电流控制 Boost PFC 变换器中,电网整流输入电压 v_i 通过前馈电路引入到电流控制环来实现 PFC 功能。当输入电压过零时,输入电流超前于输入电压造成了输入电流的波形畸变,且输入电压频率越高,相位差越大,对电流波形的畸变影响也越大。针对这个问题,本文提出了如图 3 所示的输入电流过零畸变校正的数字控制策略。通过在输入电压过零时刻检测输入的电流值,根据所检测到的电

流值来实时修正参考输入电压 v_i 的初相角,直至输入电流与输入电压同相位,从而减小输入电流的波形畸变。

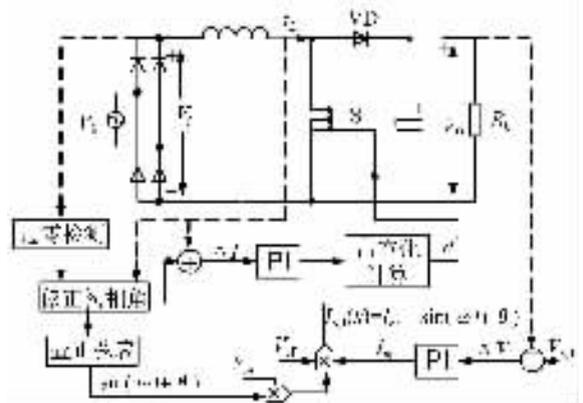


图 3 Boost PFC 变换器控制策略框图

通过改变参考输入电压的初相角,改善输入电流过零畸变的数字控制策略,仅仅需要简单的编程即可实现参考输入电压信号相位的控制,而不需要对主电路做任何改动,具有很大的灵活性,参考电压初相角修正算法的流程图如图 4 所示。

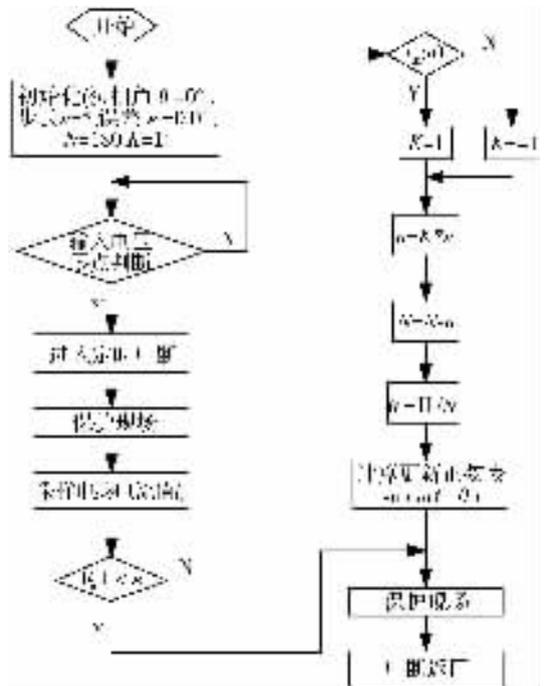


图 4 参考电压初相角修正算法流程图

3 仿真分析

针对传统的平均电流控制变换器、占空比前馈补偿控制变换器和本文提出的修正参考电压初相角补偿控制变换器,进行对比仿真研究,图 5、6 是 50 Hz 交流电源输入时的仿真波形,图 7、8 是 400 Hz 交流电源输入时的仿真波形。

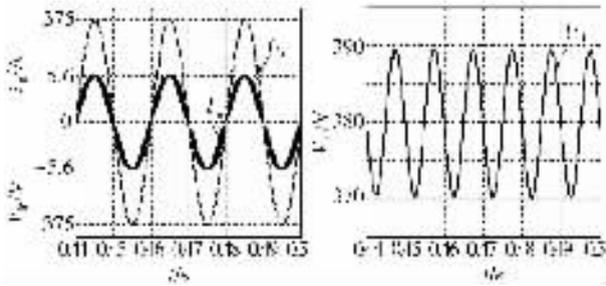


图 5 50 Hz 交流电源输入时波形

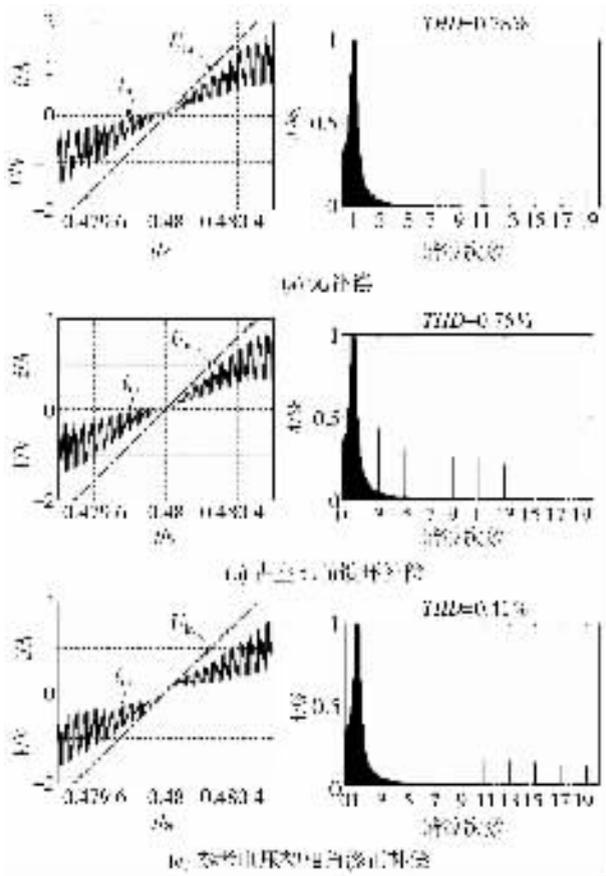


图 6 50 Hz 交流电源输入时电流过零点波形及谐波

由图 6 可以看出, 占空比前馈控制对输入电流过零畸变无明显效果, 而本文所提出的修正参考电压初相角的方法可有效地改善输入电流过零畸变现象, 同时也消除了变换器在过零点附近的 DCM 工作模式, 电流谐波由 0.78% 降到了 0.41%。

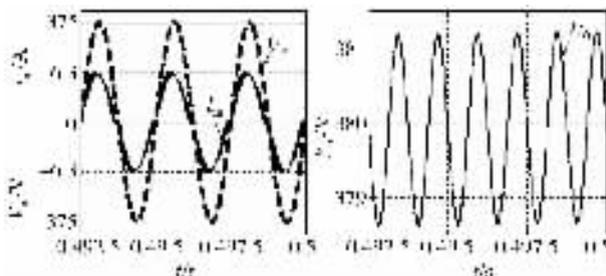


图 7 400 Hz 交流电源输入时波形

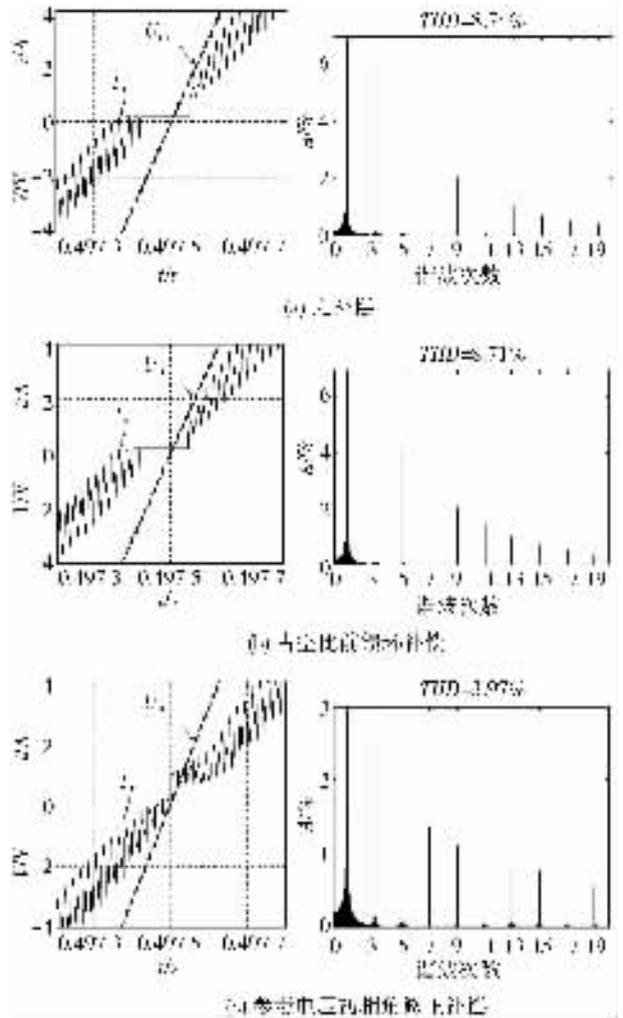


图 8 400 Hz 交流电源输入时电流过零点波形及谐波

从图 8 可以看出, 在 400 Hz 输入交流电源时, 本文提出的控制方法可有效地消除 PFC 变换器在输入电压过零点附近的 DCM 工作模式, 输入电流谐波由 8.74% 降至 3.97%, 有效地改善了输入电流谐波。

4 结语

针对功率因数校正 (PFC) 变换器普遍存在输入电压过零点附近发生输入电流畸变的问题, 本文提出了一种改善 PFC 变换器输入电流过零畸变的数字控制方法。通过在输入电压过零时刻对输入电流值的检测, 实时修正参考输入电压的初相角以减弱输入电流的过零畸变现象。仿真结果表明, 该控制方案不仅改善了输入电流的过零畸变, 而且有效地消除了工作于 CCM 模式的变换器在过零点附近出现的 DCM 工作模式。

参考文献:

[1] 周志敏, 周纪海, 纪爱华. 开关电源功率因数校正电路设

- 计与应用[M].北京:人民邮电出版社,2004.
- [2] 徐顺刚. 三相逆变电源在不平衡负载条件下的控制研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2009,26(2): 103-107.
- [3] 王跃林,申群太. 基于 DSP 数字控制的 Boost-PFC 系统设计[J]. 通信电源技术,2007,24(6):73-75.
- [4] 孙璐,陆文杭,徐顺刚. 基于 DSP 的串并联谐振逆变器研究[J]. 电焊机,2009,39(6):77-79.
- [5] 徐顺刚,陈俊昌. 一种新型交错串并联软开关逆变器[J]. 电焊机,2008,38(10):60-62.
- [6] 杨汝. 平均电流模式的控制电路设计[J]. 电力电子技术,2002,36(4):66-69.
- [7] Todd P C. UC3854 可控功率因素校正电路设计[J]. 世界电子元器件,2005(4):43-48.
- [8] Noon J P, Dalal D. Practical design issues for PFC circuits [Z]. Proc IEEE APEC, 1997.
- [9] 曲小惠,阮新波. 单相 PFC 变换器输入电流过零畸变的改善方法[J]. 电气技术,2006(3):33-39.
- [10] Vande Sype D M, Gusseme K D, Van Den Bossche A P, et al. Duty-ratio feedforward for digitally controlled boost PFC converter[J]. IEEE Transactions Industrial and Electronics, 2003, 52(1):108-115.

A Scheme for Improving Input Current Zero-Crossing Distortion of PFC Converters

XU Shun-gang

(College of Physics and Electronic Engineering , Chongqing Normal University , Chongqing 400047 , China)

Abstract : Operation in the continuous conduction mode in power-factor-correction (PFC) converters , the behavior of the current control loop determines how accurately the input current tracks the desired waveshape. Since the behavior of this loop is influenced by the impedance of the electromagnetic interference filter and the unknown time-dependent line impedance , guaranteeing stability of the converter under all circumstances is not obvious. To increase the robustness of the current-control loop against variations of the impedance at the input of the converter , the insertion of a low-pass filter in the measurement circuit of the input voltage is suggested here. However this manner may lead to more serious input current distortion when the input voltage is at the zero-crossing in converters , and this problem may be worsen in the applications with a high line frequency (e. g. , 400 Hz power systems on commercial aircraft). This paper analyzes the cause of zero-crossing distortion and indicates that input current leads the input voltage is the key reason for a non-unity fundamental displacement factor and zero-crossing distortion in boost PFC converter. A digital control method is proposed , according to the value of input current at the zero-crossing of input voltage , and the initial phase angle of reference input voltage is adjusted to improve the zero-crossing distorted phenomenon of the PFC converter. The simulation results indicate that the proposed method is good for AC power supply especially under higher frequency of 400 Hz.

Key words : power factor correction ; zero-crossing distortion ; phase displacement ; digital control

(责任编辑 欧红叶)