

开关电源功率因数校正的 DSP 实现

厉冰, 林国淑

(西安交通大学电子物理所, 陕西 西安 710049)

摘要:介绍了用 TI 公司的 TMS320LF2407A 实现开关电源功率因数调整(PFC)的原理,算法以及较为详细的实现步骤,最后给出了实验结果。

关键词:数字信号处理器;功率因数校正;开关电源

A DSP Solution for Power Factor Correction of Switching Power Supply

LI Bing, LIN Guo-shu

Abstract: A DSP based solution for power factor correction of switching power supply is introduced. The principle, algorithm and detailed implementation are discussed. At last, experiment results are provided.

Keywords: DSP; Power factor correction(PFC); Switching power supply

中图分类号:TN86 文献标识码:A 文章编号:0219-2713(2002)1·2-0032-03

1 引言

随着对高功率因数的变换器的需求不断增长,功率因数为 1(unity power factor) 的电源供给越来越受到欢迎。在计算机或其它一些设备上,电源要求鲁棒性好、可靠、抗干扰能力强。而数字控制正提供了这方面的保障。

和传统模拟控制器相比,数字控制器具有以下这些优点:可以实现非线性的精细的控制算法,减少元器件数量,提高可靠性,不易老化,很小的控制偏差和热漂移。但同时,数字控制也意味着相对较高的费用和一定的控制带宽限制。过去,这些不足在很大程度上限制了数字控制在电源方面的应用。而现在,由于高效廉价的 DSP 的出现,数字控制不仅在交流驱动(AC drives)和三相变换方面应用越来越广泛,而且在 DC/DC 变换领域也成为一种可行方案。本文将讨论 DSP 在单相开关电源功率因数校正方面的应用。

2 传统的模拟 PFC 电路简介

模拟 PFC 电路已经有了多年的应用,并且推出了一些商用的 IC 芯片,例如 TI 公司的 UC3854 等。

图 1 所示的就是功率因数校正的基本原理。PFC 控制电路主要由电压误差放大器、电流误差放大器、乘法器和 PWM 驱动组成。控制的目的是使输入电流

紧跟输入电压的变化,并使输出纹波尽可能地小。为了使输入电流跟随输入电压变化,控制电路对输入电压采样,采样信号作为乘法器的一个输入;为了保持输入电压稳定,输出电压经分压、比较和误差放大后作为乘法器的另一个输入,于是乘法器的输出具有输入电压的形状,且其幅度由输出电压控制。乘法器的输出作为输入电流的基准信号。采样输入电流,和这个基准比较,经误差放大后输入 PWM 比较器, PWM 输出驱动波形控制变换器工作。闭环反馈控制的结果使输入电流的平均值与输入电压成正比,从而达到较高的功率因数。

PFC 变换器的输出中含有二次谐波的纹波电压,

$$|\Delta V_o(t)| = \frac{P_o \cdot \sin(2\omega t)}{2\omega f C V_o} \quad (1)$$

这与变换器的拓扑结构和控制方式无关。如果通过电压回路消除输出电压的纹波,就必然会损坏输入电流的波形,从而降低功率因数。而引入模拟滤波电路

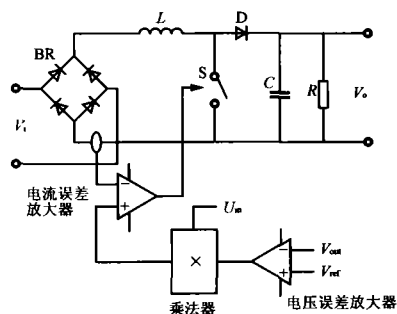


图 1 功率因数校正原理

收稿日期:2002-09-24

的话,又会引入不良的相位影响,而且由于模拟元件参数离散性大、易老化和热漂移等因素,很难实现精确的滤波。所以对于 50 Hz 的工频输入,电压回路的带宽一般都只选在 10 ~ 20 Hz。

3 数字控制的 PFC 模型

如图 2 所示是 Boost 电路 PFC 的数字化模型。该模型的控制原理与前面所述的模拟电路是一致的。区别就是用两个数字的比例积分控制器(PI) K_i 、 K_v 代替了原来的两个误差放大器。另外,在电压 PI 的输出端增加了一个陷波滤波器,滤波频率为 100 Hz。与模拟滤波器相比,数字滤波可以很好地减少 100 Hz 的谐波成分,同时引入的相位影响却要小得多。

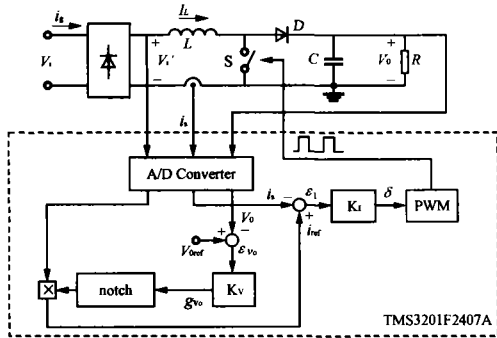


图 2 数字控制的 PFC 模型

这样,就可以提高电压回路的带宽,继而提高电路的反应速度。

如图 2 所示,三个信号被采样,分别是输出电压 V_0 , 输入电流 I_1 , 输入电压 V_1 。其中值得注意的一点是,我们可以编程实现总是在开关闭合的中间时间对 I_1 采样,从而不需要另加低通滤波就可以获得 I_1 的平均值。

接下来我们分别建立 PI 控制器和陷波滤波器的数字模型。PI 控制算法的模拟表达式为

$$V(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right] \quad (2)$$

对式(2)进行离散化处理,得到

$$V(n) = K_p [e(n) - e(n-1)] + K_i \cdot e(n) + V(n-1) \quad (3)$$

式中: K_p 为比例系数;

$K_i = \frac{T}{T_i} K_p$ 为积分系数, T 为采样周期, T_i 为积分时间常数。

PI 系数的整定常常通过实验来确定,或通过凑试,或者通过经验公式来确定。这方面的内容一般的计算机控制系统类的书上都有介绍。

陷波滤波器的设计可参照公式(4)

$$\frac{S^2 + \omega^2}{S^2 + \frac{\omega}{Q}S + \omega^2} \quad (4)$$

式中: ω 是滤波频率的角速度;

Q 值按不同的要求确定。

离散化可以由 Matlab 的 `sysd = c2d(sys, Ts)` 方程方便地实现。图 3 所示的就是所设计滤波器的 Matlab 模拟图,其中 $\omega = 628$, $Q = 20$ 。

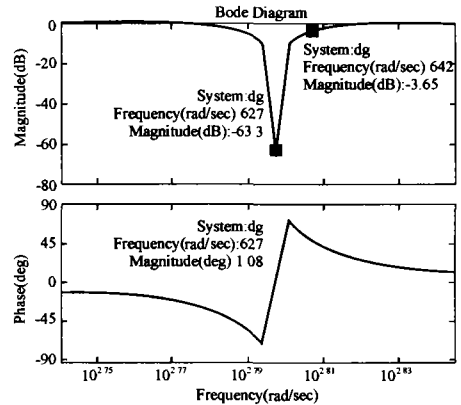


图 3 数字陷波器的 Matlab 模拟

4 DSP 实现

我们采用 TI 公司的 16 位芯片 TMS320LF2407A 来实施控制方案。这款芯片专门用于数字控制的 2000 系列,采用哈佛结构的 CPU 和 4 级流水性操作的程序控制,运行速度是 40MIPS(即 25ns 的指令周期)。它具有 544 字节的 DARAM, 2k 的 SARAM, 32k 的 FLASH, 2 个事件管理单元, 16 路 10bit、转换时间 500ns 的 A/D 转换,最多 16 路的 PWM 输出等片内资源。

对电流回路和电压回路,我们分别采取 20kHz 和 10kHz 的控制频率。两个中断程序被用来完成 PFC 的数字控制,中断程序 int2 负责 3 个输入的采样及电流回路的 PI 控制,另一个中断程序 int3 负责电压回路的 PI 控制及陷波滤波。图 4 是主程序控制流程图,图 5 是采样周期图。其中 int2 的中断优先级高于 int3,所以若 int3 没完成,而 int2 中断发生时, int3 将悬挂直到 int2 中断程序运行结束才继续运行。因为电压回路的变化比较缓慢,所以一个周期的延时不会影响控制效果。设置比较控制寄存器,在 T1 下溢的时候写入新的比较值,结合通用定时器周期寄存器 T1PR 的值,产生新的占空比的 PWM 波,控制与之相连的开关管的动作。从图 5 中我们也可以注意到, int2 的中断程序(包括 3 个采样和一个 PI 程序)必须在半个电流采

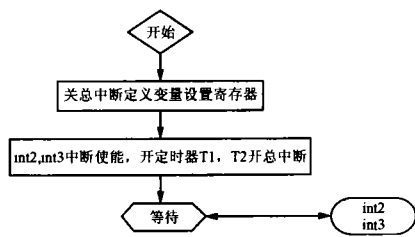


图4 主程序流程图

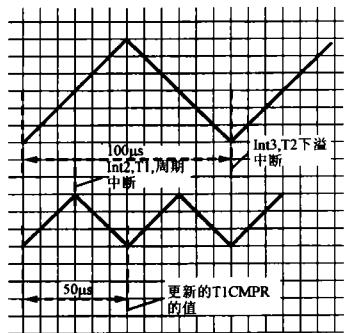


图5 采样周期图

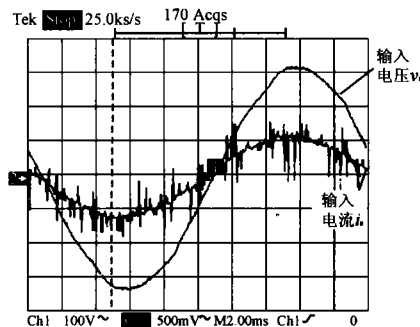


图6 BOOST PFC电路输入电压电流图

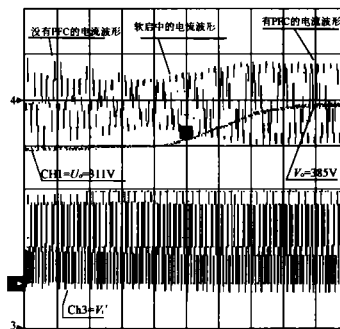


图7 软启动波形图

样周期,即 $25\mu\text{s}$ 之内完成。根据前面给出的 DSP 的性能指标,这个目标完全可以达到。

另外,在实际应用中,采用的是积分分离的 PI 算法,把 PI 的输出值限定在一定的范围之内,避免使系统产生很大的超调量而引起系统振荡。还加入了软启动程序,在程序刚开始的时候逐步加大 V_{ref} 的值,从而达到开关电源的软启动要求。

因为像 K_p , K_i 及滤波器系数等这些参数都是浮点数,而所用的是 16 位的芯片,所以用 DSP 实现以上算法,还需要解决浮点数和定点数之间相互转换的问题。可以用不同的 Q_n 值来表达不同范围和精度的浮点数,其中 n 表示 16 位中小数点之后的位数。例如, Q_0 可表示 -32768 到 32767 的整数,而 Q_{15} 可表达 -1 到 0.9999695 之间精度为 $1/32768$ 的实数^[2]。不同的 Q_n 值之间需要经过移位,转换为相同的位数才能进行比较和加减运算。

5 实验结果

程序编译通过后,烧入片内 flash,外加简单的外围电路,就可以进行实验验证了。我们采用的是 Boost 电路的拓扑结构,接电阻负载,输入电压 220V ,输出电压 385V ,得到的输入电压电流波形如图 6 所示。用功率表测得 PFC 电路的输入功率为 545W ,输出功率为 513W ,可以计算出 PFC 电路变换效率为 94.1% 。在相同测试条件下,用功率因数表测得的 PFC 电路的功率因数为 0.983 。图 7 所示的是软启过程。

6 结语

本文探讨了开关电源功率因数调整的全数字实现方案,实验证明了该方案的可行性。目前,对开关整流器件采用 DSP 控制的研究开展的还不多,主要是由于相对于专用的集成芯片 DSP 的价格比较高昂,而且成熟的控制算法难以获得。然而,随着 DSP 芯片价格的不断降低和控制算法的研究不断深入,相信开关整流器件数字控制的时代很快就会到来。

参考文献

- [1] S. Buso, P. Mattavelli, L. Rossetto, G. Spiazzi, Simple digital control improving dynamic performance of power factor pre-regulators[J]. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS* (13)5, 1998.
- [2] U-134, UC3854 Controlled Power factor Correction Circuit Design, Power Supply Control Products Data Book[M]. Texas Instruments.
- [3] TMS320LF/LC240XA DSP Controllers Reference Guide Tech. Rep. SPRU357B, Texas Instruments, 2001.

作者简介

厉冰(1979-),男,西安交通大学电子物理与器件国家重点实验室物理电子专业硕士研究生。

林国淑(1940-),女,西安交通大学毕业,高级工程师,从事电子电路研究,开关电源设计。