

基于抗饱和 PI 调节器的 BUCK 变换器的设计与实现

江 澜, 蔡 文

(上海师范大学 信息与机电工程学院 上海 200234)

摘 要: 基于 DSP 设计并实现了一种抗饱和的数字 PI 调节器, 将其应用于 BUCK 变换器的电压、电流双闭环系统设计中, 并在一台功率为 5.5KW 的实验样机上进行了实验研究. 实验结果表明: 该变换器具有良好的静态、动态性能, 验证了该 PI 调节器设计的有效性.

关键词: 双闭环; PI 调节器; BUCK 变换器

中图分类号: TP 272 文献标识码: A 文章编号: 1000-5137(2013)01-0020-05

0 引 言

PID 控制是发展最早、应用最广的一种控制策略, 由于其算法简单、鲁棒性较好、可靠性高, 被广泛应用于各类工业控制的算法设计中^[1-2]. 特别在不完全了解一个系统或被控对象的实际参数, 或不能通过有效的测量手段来获得准确的系统参数时, 往往采用 PID 控制^[2].

在电力电子变换器的设计中, 由于系统本身是一个非线性、时变系统, 因而常常采用 PID 控制器进行设计. 在实际应用中, 由于系统对快速性的要求不那么高, 因而在系统设计中常常采用 PI 调节器^[1]. 在 PI 调节器的设计中, 若 PI 算式中的积分量积累了过大数值, 以至于超出执行元件的极限能力, 就会出现积分饱和现象^[1-2], 进而影响系统性能. 本文作者基于 TI 公司的 DSP2812 设计并实现了一种抗饱和的数字 PI 调节器, 将其应用于 BUCK 变换器的控制中, 采用电流、电压双闭环控制^[3], 取得了良好的动、静态性能.

1 BUCK 电路结构

BUCK 变换器的基本电路拓扑结构如图 1 所示^[4-5], 其中 DC 为输入的直流电压, 全控型器件 IGBT 作为开关管 V 与反向并联的续流二极管 VD 一起构成控制模块, 以控制从电源端输出到负载端的能量. 图 1 中 L 和 C 构成低通滤波电路, Z 为负载. 设主回路电流为 I_L , 输出直流电压为 U_o .

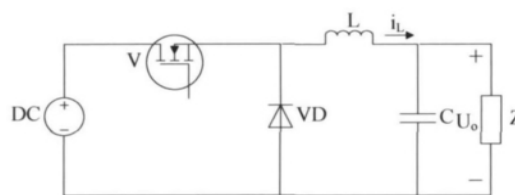


图 1 BUCK 电路原理图

图 2 是开关管 V 导通时的等效电路^[4-5]. 当 V 闭合时, 直流电源向负载供电, 在此阶段, 电感 L 充电储能, 主回路电流呈线性增长, 续流二极管 VD 由于两端施加反向电压而截止.

收稿日期: 2012-12-10

作者简介: 江 澜(1988 -) 男, 上海师范大学信息与机电工程学院硕士研究生; 蔡 文(1971 -) 女, 上海师范大学信息与机电工程学院副教授.

图 3 是开关管 V 截止时的等效电路^[4-5]. 当开关管 V 截止时, 直流电源与负载断开, 电感 L 释放能量, 二极管 VD 续流. 在此阶段, 电感 L 通过负载放电, 主回路电流线性减小. 为了使输出电压满足要求, 有必要在负载端并联合适的电容.

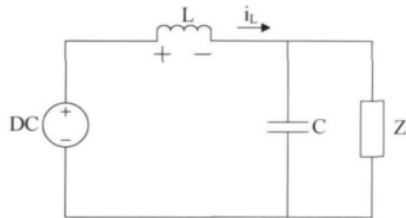


图 2 开关 V 导通时的等效电路

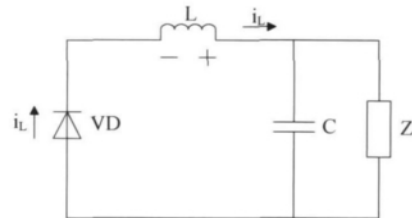


图 3 开关 V 断开时的等效电路

BUCK 变换器可以输出两种类型的直流电压^[6]: 一是输出电压可在一定范围内调节控制; 二是输出一个恒定的直流电压. 本次设计的是输出恒定电压的 BUCK 变换器.

2 BUCK 变换器闭环控制系统及抗饱和数字 PI 调节器的设计

2.1 BUCK 变换器闭环控制系统

为提高 BUCK 变换器的静态、动态性能, 采用电压外环、电流内环的双闭环控制系统^[3], 示意图如图 4 所示.

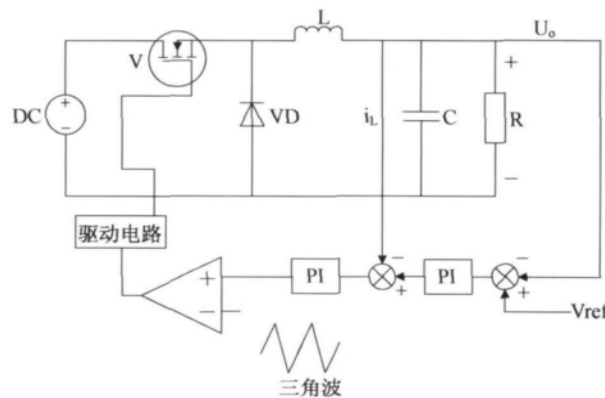


图 4 BUCK 变换器控制示意图

在图 4 中, 将参考电压 V_{ref} 与检测到的输出电压 U_o 相减, 结果送入电压环的 PI 调节器, 该 PI 调节器的输出信号即为电流内环的参考输入信号. 同时, 将在主回路中检测到的电流 I_L 作为反馈信号与电流参考信号相减, 结果送入电流环的 PI 调节器, 并与三角载波做比较, 得到开关管 V 的 PWM 脉宽调制信号. BUCK 变换器控制系统框图如图 5 所示, 其中的电流内环能够限制主回路最大电流, 快速抑制电源扰动; 电压外环, 能够稳定输出电压.

2.2 抗饱和数字 PI 调节器的设计

PI 调节器的控制规律为^[2-3]:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt \right].$$

其中 $\mu(t)$ 为 PI 控制器的输出, $e(t)$ 为 PI 调节器的输入, K_p 为比例系数, T_I 为积分时间常数. 对上式进行离散化处理, 则 PI 控制算法表达式为:

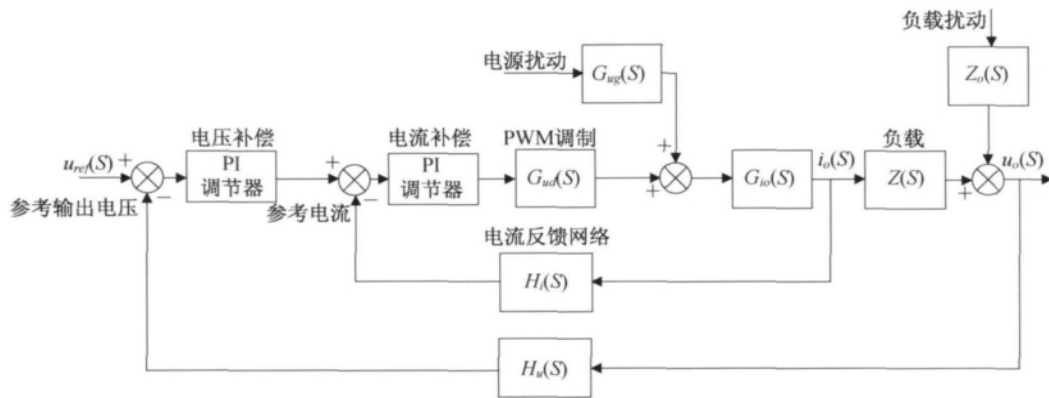


图5 双闭环控制系统框图

$$u(k) = K_p \left[e(k) + \frac{T_s}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) \right] = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) \quad .$$

其中 $k=0, 1, \dots$ 表示采样序列 $\mu(k)$ 表示第 k 次采样时刻 PI 调节器的输出值 $e(k)$ 表示第 k 次采样时刻输入的偏差值 T_s 表示采样周期 K_p 为比例系数 K_i 为积分系数。

常用的数字 PI 调节器有位置式和增量式控制算法^[2]。采用位置式算法: PI 调节器的输出可以直接控制执行机构。这种算法的优点是计算精度比较高,缺点是每次都要对 $e(k)$ 进行累加,容易出现积分饱和现象。一旦出现积分饱和的情况,就会引起执行机构位置的大幅度变化,造成被控对象的不稳定。为抑制这种情况的出现,采用位置式抑制积分饱和的 PI 算法,其表达式为:

$$\begin{aligned} U(n) &= K_p \cdot e(n) + I_n(n-1) \quad , \\ I_n(n) &= I_n(n-1) + K_i \cdot e(n) + K_{sat} \cdot e_{pi} \quad , \\ e_{pi} &= U_s - U(n) \quad . \end{aligned}$$

其中:当 $U(n) \geq U_{max}$ 时, $U_s = U_{max}$; 当 $U(n) \leq U_{min}$ 时, $U_s = U_{min}$ 。

U_s 为 PI 算法的饱和输出; $U(n)$ 表示本次的 PI 调节器的计算结果; K_p 为比例调节系数, K_i 为积分系数, K_{sat} 为抗饱和系数, $I_n(n)$ 为本次积分累加和, U_{max} 、 U_{min} 分别为 PI 调节器输出的最大值和最小值。抗饱和 PI 调节器算法的程序框图如图 6 所示。

3 实验结果及其分析

为验证设计的效果,在一台功率为 5.5 KW 的 BUCK 变换器的实验平台上进行了实验。在图 1 中的输出端并联 390 μ F/500 V 电容,在主回路中串联的电感容量为 1205 μ H,开关频率为 20 KHz。主电路中的电压、电流检测均由霍尔传感器实现。

经过处理后的模拟量送入 DSP 内置的 A/D 口,完成到数字量的转换,各种运算及控制算法均由 DSP 编程实现。

可变直流输入电压最大为 60 V,设输出稳定直流电压为 15 V,带电阻性负载,进行了以下实验:

(1) 电源电压变化:输入电压从 20 V 突增到 30 V,得到的输出电压、输出电流及 PWM 控制信号波形

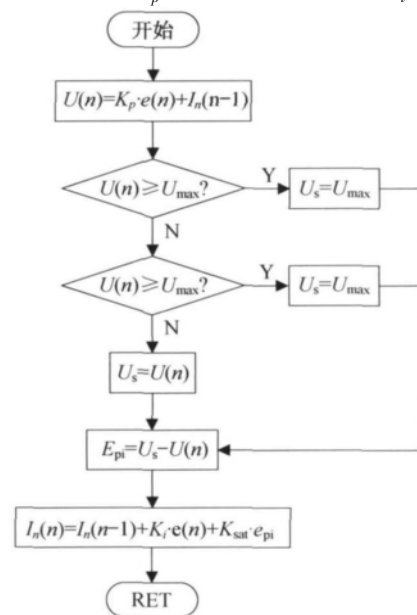


图6 抑制积分饱和的 PI 算法

如图 7 所示.

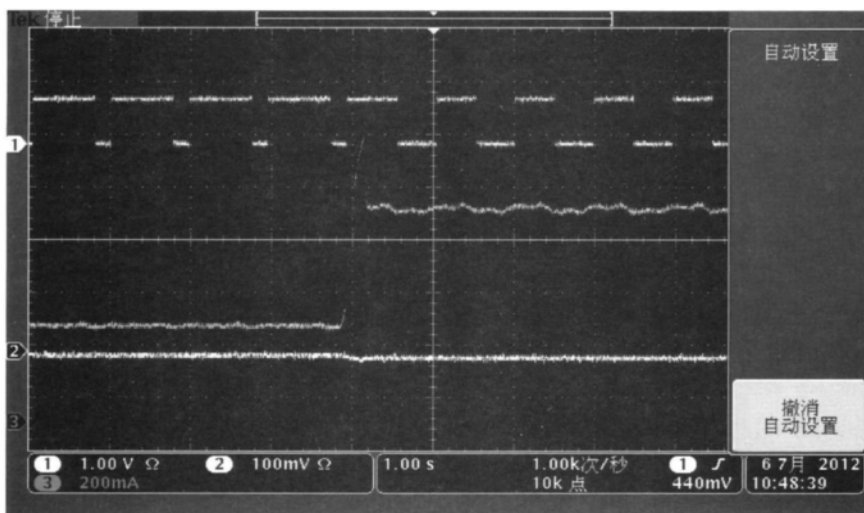


图 7 电源扰动时驱动信号、电流、电压波形

(2) 改变负载大小: 将负载从 18.3Ω 突加到 27.5Ω 得到电压、电流及 PWM 控制信号波形如图 8 所示.

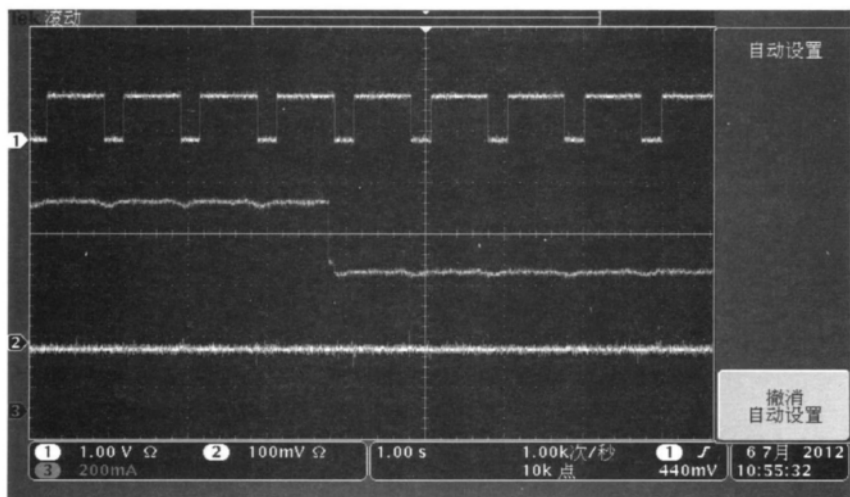


图 8 负载扰动时驱动信号、电流、电压波形

图 7、8 中的波形为数字式多踪示波器的输出结果, 其中第 1 踪为开关管 V 的驱动信号; 第 2 踪为主回路电流波形, 第 3 踪为输出电压波形.

由图 7 可见, PWM 信号脉宽变窄, 电流突增, 但经过短暂时间后(小于 100 ms), 电流趋于稳定. 电压经过微小扰动后同样趋于稳定.

由图 8 可见, 随着负载的改变, 主回路中的电流随之改变, 但是输出电压稳定.

4 结 论

由于 PID 参数直接影响着控制效果的好坏, 本文作者采用工程整定方法, 依赖工程经验, 直接在控制系统的实验中进行 PI 参数整定^[2], 方法简单、调整方便. 将有抑制饱和和积分功能的 PI 调节器运用于

BUCK 变换器的电压外环、电流内环的设计中,起到了稳压限流的作用,系统取得了良好的动、静态性能^[6]. 实验结果验证了设计的有效性.

参考文献:

- [1] ALI E ,ALIREZA K ,ZHONG N ,et al. 连晓峰译. 集成电力电子变换器及数字控制 [M]. 北京: 机械工业出版社 2011.
- [2] 白志刚. 自动调节系统解析与 PID 整定 [M]. 北京: 化学工业出版社 2012.
- [3] BUTI B ,NAGY I. Stability analysis of PWM-controlled dual channel resonant buck converter using PI controller [C]// IEEE SPEEDAM 2006 ,Palazzodei Congressi Taormina: IEEE Inc 2006: 208 -213.
- [4] 杜飞 林欣. 电力电子技术的 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 中国电力出版社 2009.
- [5] 曹霞 ,关振宏 ,黄栋杰 等. Buck 变换器在 Matlab/Simulink 下的仿真研究 [J]. 电器开关 2009 47(6): 23 -25.
- [6] BRADLEY M ,ALARCON E ,FEELY O. Analysis of limit cycles in a PI digitally controlled buck converter [C]// IEEE ISCAS 2012 ,Seoul: IEEE Inc 2012: 628 -631.

Design and realization of the BUCK converter based on anti-saturated PI controller

JIANG Lan , CAI Wen

(College of Information ,Mechanical and Electrical Engineering ,Shanghai Normal University ,Shanghai 200234 ,China)

Abstract: A kind of anti-saturated digital PI regulator is designed and implemented based on DSP. This PI regulator was applied to the system design of voltage and current double-loop control in a BUCK converter and related experimental research was made in a 5.5 KW prototype machine. Experimental results show that the converter has good static and dynamic performances and the validity of the design of the PI regulator is verified.

Key words: double closed loop; PI regulator; BUCK converter

(责任编辑: 包震宇)