

# 基于预测模糊PID控制的航空DC/DC变换器设计

刘翔 冀捐灶 牛刚 周伟

(空军工程大学 工程学院,西安 710038)

摘要:针对高性能的航空静止 DC/DC 变换器采用的数字控制系统存在的延迟问题,提出一种基于预测模糊 PID 控制策略的 DC/DC 变换器实现方法。选用双管正激电路(TTFC)为主功率电路,采用 DSP 芯片 TMS320LF2407 为主处理单元,对系统的硬件、软件进行设计,调试出一台 500W 的 DC/DC 变换器原理样机。实验结果表明,该控制器完全补偿了数字控制系统的控制延迟,极大节约了数字控制器的资源,控制效果良好,样机的性能基本达到预期技术指标。

关键词:航空 DC/DC 变换器;双管正激电路;模糊 PID 控制;数字控制延迟;预测控制

中图分类号:TM46;TP273+.4

文献标识码:A

文章编号:1001-1390(2009)07-0066-04

## Design of Aviation Static DC/DC Converter Based on Forecast Fuzzy PID Control

LIU Xu, JI Juan-zao, NIU Gang, ZHOU Wei

(Air Force Engineering University Engineering College, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** Aiming at the delay problem of digital control system of aviation static DC/DC converter, this paper presents a control strategy of forecast Fuzzy PID. The hardware and software of a 500W principle sample are designed, with the double switch forward circuit for its power transformation unit, and DSP chip TM320LF2407 as its main disposal unit. The experiment results show that the controller can compensate the delay of digital control system completely, and save resource of the controller. And the sample transformation equipment's performance has basically reached the expected target.

**Key words:** aviation DC/DC Converter, TTFC, fuzzy PID control, digital control delay, forecast control

### 0 引言

随着航空供电体制的不断发展,高压直流供电系统将逐步取代115V/400Hz恒频交流系统成为第四代战机的首选供电体制<sup>[1]</sup>。研究和设计高性能的DC/DC变换器对推进航空高压直流供电体系的发展有着十分重要的意义。

目前,高性能的航空静止DC/DC变换器大都采用数字控制系统。而数字控制系统存在着控制延迟问题,导致系统相位裕度减小。针对这一问题,本文运用预测控制方法,提出一种基于预测模糊PID的航空静止DC/DC变换器数字控制器。下面将从主功率电路拓扑选择、闭环控制器设计、原理样机设计、实验结果分析等几方面进行介绍。

### 1 模糊PID控制器

#### 1.1 双管正激电路

双管正激电路<sup>[2]</sup>拓扑如图1所示。该电路的优点:

结构简单,控制容易;克服了单端正激变换器中开关管应力高的缺点;桥臂上串联的二极管具有箝位主功率管电压尖峰和为变压器提供磁复位通路的作用,不需要增加特殊的复位电路就可以保证变压器的可靠磁复位;每一个桥臂都由一个开关管和一个二极管串联而成的,从结构上消除了上下桥臂直通的现象,可靠性高。通过以上分析,双管正激电路适合高压输入低压输出航空静止DC/DC变换器的需要,因此,本文选取双管正激电路作为主功率电路拓扑。

针对双管正激DC/DC变换器这一典型二阶系统,

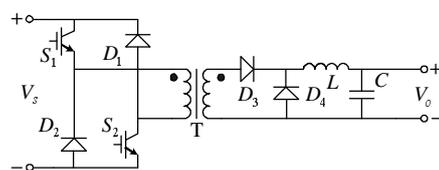


图1 双管正激电路拓扑结构

Fig.1 Two-transistor forward converter topology

将模糊PID控制策略运用其中,具体设计步骤如下。

### 1.2 确定模糊变量

本文选取两个模糊输入变量,分别定义如下:变换器实际输出电压 $V_o$ 与参考电压 $V_{ref}$ 的误差 $e(z(k)=V_{ref}(k)-V_o(k))$ ;误差变化量 $ec(zc=e(k)-e(k-1))$ 。输出模糊变量:PID控制器的三个参数的变化量 $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 和 $\Delta k_d$ 。

### 1.3 确定隶属函数

隶属函数应覆盖整个取值范围,同时,之间应该有重叠,以便提高鲁棒性,一般重叠率为25%~50%。根据DC/DC变换器实际工作情况<sup>[3]</sup>,这里将 $e$ 和 $ec$ 的变化范围定义为 $z=ec=\{3, 2, 1, 0, 1, 2, 3\}$ ,其模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ ,它们的隶属函数选为三角形。

将PID控制器的三个参数变化量 $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 和 $\Delta k_d$ 的变化范围分别定义为 $\Delta k_p=\{0.3, 0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3\}$ ; $\Delta k_i=\{0.06, 0.04, 0.02, 0, 0.02, 0.04, 0.06\}$ ; $\Delta k_d=\{3, 2, 1, 0, 1, 2, 3\}$ ,模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ ,隶属函数服从正态分布。

### 1.4 设计控制规则

根据 $e$ 和 $ec$ 的变化情况,可以确定PID参数变化的规则,分别从以下几个方面进行讨论<sup>[4-6]</sup>:

(1)当 $|e(k)|>M_1$ 时( $M_1$ 为设定的阈值),按控制器的最大作用控制,迅速调整偏差。

(2)当时 $e(k)ec(k)>0$ ,如果( $M_2$ 为设定的另一个小于 $M_1$ 的阈值),应实施较强的控制作用,以控制偏差绝对值朝减小的方向变化;如果 $|e(k)|<M_2$ ,考虑一般的控制作用,只需扭转偏差的变化趋势。

(3)当 $e(k)ec(k)<0$ 或者 $e(k)=0$ 时,维持原来的控制不变。

(4)如果 $|e(k)|<\varepsilon$ 偏差,应增加积分作用来消除静差,提高系统的控制精度。

根据以上控制规则可以建立 $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 和 $\Delta k_d$ 的模糊控制规则表,如表1~3所示。

## 2 预测模糊PID控制器

### 2.1 预测控制原理

预测控制的原理是在第 $k$ 个周期时,估算第 $k+1$ 个周期的输出值 $y^*(k+1)$ ,用 $y^*(k+1)$ 与给定值 $V_{ref}$ 比较得到偏差,从而得到控制量 $u^*(k+1)$ ,可以无滞后地控制输出,使延迟得到补偿。如果第 $k$ 个采样周期预测的第 $k+1$ 个周期的输出值 $y^*(k+1)$ 等于第 $k+1$ 个周期的实际输出值 $y(k+1)$ ,则延迟可以得到完全补偿。因此,由于开关电源占空比只能在一个开关周期开始时更新,所

产生一个采样周期的延迟能够得到补偿<sup>[7-8]</sup>。

表1  $\Delta k_p$ 模糊控制规则表

Tab.1 Fuzzy rules of  $\Delta k_p$

$\Delta K_p \begin{matrix} e \\ ec \end{matrix}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZO
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	ZO	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB

表2  $\Delta k_i$ 模糊控制规则表

Tab.2 Fuzzy rules of  $\Delta k_i$

$\Delta K_i \begin{matrix} e \\ ec \end{matrix}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

表3  $\Delta k_d$ 模糊控制规则表

Tab.3 Fuzzy rules of  $\Delta k_d$

$\Delta K_d \begin{matrix} e \\ ec \end{matrix}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	PS	ZO	ZO	ZO	PB	PB
NM	NS	NS	NS	NS	ZO	PS	PM
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PM
PS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
PM	NM	NS	NS	NS	ZO	PS	PS
PB	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	PB	PB

### 2.2 DC/DC变换器输出预测值推导

由变换器主回路的小信号动态模型,推导出其控制到输出的传递函数。为便于分析,可以将其表示为如下形式:

$$G(s) = \frac{K_1 s + K_2 \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

式中  $K_1 = \frac{nV_s R_o r_c}{(R_o + r_c)L}$ ;  $K_2 = \frac{nV_s R_o}{R_o + r_c}$ ;  $\omega_n = \sqrt{\frac{R_o + r_L}{LC(R_o + r_c)}}$ ;

$$\zeta = \frac{L + r_c r_L + r_c R_o + R_o r_L}{2\sqrt{LC(R_o + r_c)(R_o + r_L)}}$$

对式(1)进行Z变换得到:

$$G(z) = \frac{K_2 Z [1 - a(\theta + \cos\theta)] + a[a + b - \cos\theta]}{Z^2 - 2a\cos(\theta)Z + a^2} \quad (2)$$

式中  $a = e^{-\zeta \omega_n T_s}$ ;  $b = T_s \zeta \omega_n - K_1/K_2 \sin(\theta)/\theta$ ;  $\theta = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} T_s$ 。

由式(2)的差分方程形式可以得到第 $k+1$ 个采样周期时的输出预测值 $y^*(k+1)$ 如下:

$$y^*(k+1) \approx K_2 a (a+b-\cos\theta) u(k-1) + 2a \cos\theta - a^2 y(k-1) + K_2 [1-a(b+\cos\theta)] u(k) \quad (3)$$

如果采样频率比系统的时间常数高得多,则 $\zeta\omega_n T_s$ 将很小,因此可以作以下近似 $\alpha=1, \beta=0, b=-T_s K_1/K_2$ ,化式(3)为:

$$y^*(k+1) \approx 2y(k) - y(k-1) + K_1 T_s [u(k) - u(k-1)] \quad (4)$$

如果每两个采样周期更新一次控制量,则 $u(k)=u(k-1)$ ,那么式(4)可进一步简化为:

$$y^*(k+1) \approx y(k+1) \approx 2y(k) - y(k-1) \quad (5)$$

经整理得:

$$y^*(k+1) \approx \frac{2z-1}{z} y(z) \quad (6)$$

这就是基于线性外推法所推导出的输出预测值。结合了预测环节的控制系统框图如图2所示。

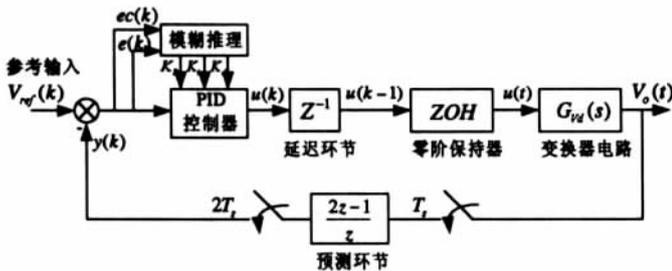


图2 带预测环节的控制系统框图

Fig.2 The diagram of control system with forecast part

由于在推导输出预测值的过程中,采用每两个周期更新一次控制量,因此DC/DC变换器不需要在每个开关周期都更新控制量。这样可以大大节约数字控制器的资源,用于完成监控、通讯、电源管理等其他任务。

### 3 航空静止DC/DC变换器设计

#### 3.1 系统结构

本文实现的基于DSP的航空静止DC/DC变换器是能够在线热插拔的模块化静止变换器。总体结构如图3所示。

主要由主功率电路、驱动电路、主控芯片、输入输出滤波器、采样及保护电路等几部分组成。其中输入输出滤波器为低通滤波器;主功率电路为双管正激拓扑结构,主要由IGBT开关管和功率二极管组成。驱动电路主要给开关管提供驱动信号;主控芯片为控制算法的实现提供平台,同时为系统提供必要的保护;采样电路包含输出电压、电流的A/D采样;机内辅助电源主要是向主控芯片、驱动、保护及采样电路提供多路电源。

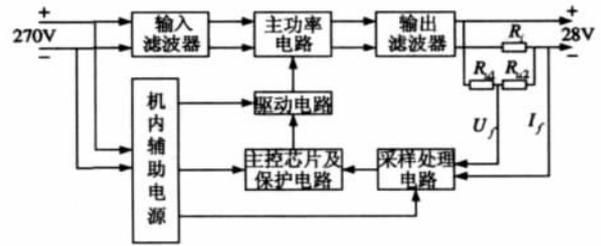


图3 系统总体结构

Fig.3 Structure of the whole system

#### 3.2 硬件设计

以DSP芯片TMS320LF2407为主处理单元;主功率管采用IR公司生产的IRG4PC40U型的IGBT作为主功率管;由于变压器工作频率较高,因此整流二极管和续流二极管均选取快速恢复二极管,型号为STTA9012TV,平均电流为45A,反向峰值电压为1200V;高频变压器选取的磁芯材料是EI型铁氧体R2KBD,其剩磁低,电阻率高,可工作至150kHz,是比较理想的磁性材料;机内辅助电源采用型号为TO227Y的集成开关电源芯片。

#### 3.3 软件总体流程

软件流程主要包括A/D采样模块、预测模糊PID整定模块、PWM占空比调整模块,以及相关的中断、保护、故障指示和恢复现场等模块。系统软件总体流程如图4所示。

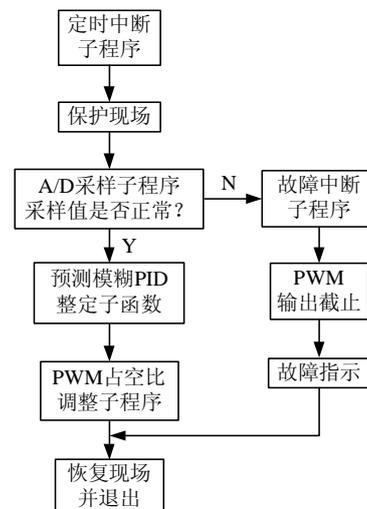


图4 系统软件总体流程

Fig.4 The flow of the system software

### 4 实验结果

参考“GJB181A—2003”直流供电部分,本文设计的500W航空静止DC/DC变换器主要技术指标为:输入电压 270VDC,稳态值250~280V,最大脉动幅度6.0V;输出电压 28VDC,稳态值22~29V,最大脉动幅

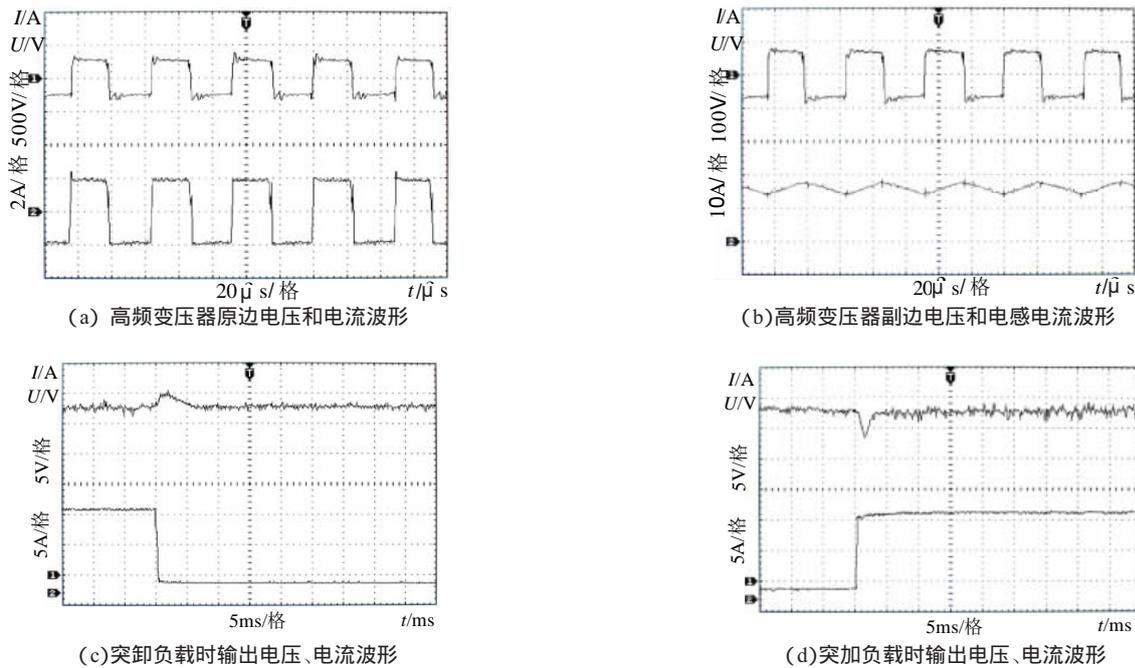


图5 原理样机实验波形

Fig.5 The experiment waveform of principle sample

度1.5V;额定功率 500W;变换效率  $\geq 90\%$ ;保护功能 输出过压、过流保护和开关管过流保护。

实验参数选择如下 输入电压为直流270V,开关频率20kHz, 变压器变比 $n=0.25$ , 输出滤波电感 $L=700\mu\text{H}$ , 滤波电容 $C=1000\mu\text{F}$ 。

从图5(a)、(b)可以看出,变压器输出功率基本达到额定值 输入输出特性良好。当系统负载由400W突卸至40W时 输出电压、电流波形如图5(c)所示,系统的超调量为7.1%,调节时间为7ms。当系统负载由40W突加至400W时 输出电压、电流波形如图5(d)所示,超调量为16.1%,调节时间为6ms。

同时 样机最高效率可达91.2%,工作在额定状态时效率基本维持在90%左右,达到设计要求。

## 5 结论

本文设计一种基于预测模糊PID控制策略的航空静止DC/DC变换器,调试了500W原理样机。实验结果表明,该原理样机的主要技术指标基本达到了预期目标,预测环节完全补偿了数字控制延迟,控制效果良好,具有一定的工程实践价值。

## 参考文献

[1] 严仰光.飞机高压直流电气系统的构成与发展[Z].APSC,2001.  
[2] 盛专成,李广勇,贺怀谦.一种双正激电路的软关断拓扑[J].电力电子

技术 2001 (3).

SHENG Zhuan-cheng, LI Guang-yong, HE Huai-qian. A New Soft Switching Topology for Double Switching Forward Converter [J]. Power Electronics, 2001,(3).

[3] 周蕙馨,张岳,陈明豪等.飞机直流供电系统[M].西安:空军工程学院,1988.

[4] Jinbang Xu, Jin Zhao, Ling Luo. Expert PID control for AC/DC converter [A]. Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation (IEEE Cat. No.04EX788)[C]. 2004, 55(6): 86~90.

[5] Thompson S, Mc Cluskey E G. An expert adaptive PID controller [J]. Adaptive Systems in Control and Signal Processing, 1990, 12(13): 57~62.

[6] Myron T J. Self-tuning PID control- an expert system approach, Automatic Control in Petroleum, Petrochemical and Desalination Industries [J]. Proceedings of the IFAC Workshop, 1986, 15(8): 77~80.

[7] 余世明. 预测控制算法及其应用研究[D]. 浙江 浙江大学, 2001.

[8] 王首彬. 预测PID控制器的设计与实现研究[D]. 山东 燕山大学, 2007.

作者简介:  
刘栩(1985-) 男,汉族,河北安平人,硕士研究生,专业为电力电子与电力传动,研究方向为电能监控与处理。Email: tq03711z@163.com

冀捐灶(1966-) 男,汉族,陕西商洛人,副教授,硕士生导师,研究方向为航空电气工程及飞机健康状态监控。

牛刚(1982-) 男,汉族,辽宁盖州人,硕士研究生,专业为电力电子与电力传动,研究方向为电能监控与处理。

周伟(1984-) 男,汉族,陕西周至人,硕士研究生,专业为电力电子与电力传动,研究方向为电能监控与处理。

收稿日期 2009-02-14

(常会敏 编发)