

# 基于 DSP 和 FPGA 的消弧线圈 数字励磁调节器

邵国君, 蔡 旭

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200030)

**摘要:** 采用数字信号处理器(DSP)TMS320LF 2407 和现场可编程门阵列(FPGA)EP1C 6 设计数字比例积分(PI)调节器。DSP 主要完成采样、PI 调节和通信等,实现偏磁式消弧线圈励磁电流的数字控制。FPGA 主要用于生成晶闸管触发脉冲及触发保护等。通过建立 PI 输出和控制角的线性化函数,简化控制程序,使励磁电流快速跟踪给定电流。介绍了系统的硬件和软件设计,其中晶闸管触发系统由同步、移相、脉冲形成、脉冲放大等环节构成。分别采用 C 和 VHDL 语言开发了 DSP 和 FPGA 模块,并提供了主程序及采样中断程序流程。实验表明该系统励磁电流动态响应小于 5 ms,满足偏磁式消弧线圈的控制要求。

**关键词:** 偏磁式消弧线圈; 励磁电流; PI 调节器; DSP; FPGA

**中图分类号:** TM 571.6+5 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-6047(2006)08-0075-03

## 0 引言

在中性点不接地电网中,治理单相接地电容电流过大所造成危害的方法之一,是在中性点加装消弧线圈。消弧线圈的作用是:当电网发生单相接地故障后,提供电感电流,补偿接地电容电流,使接地电流减小,并使故障相接地电弧两端的恢复电压速度降低,达到熄灭电弧的目的<sup>[1]</sup>。目前,偏磁式消弧线圈是一种比较先进的消弧线圈,能否实时、快速地给偏磁式消弧线圈建立给定的强励磁电流是能否快速灭弧、减小故障损害的关键。

本文采用 TMS320LF 2407(简称 2407)<sup>[2]</sup>和 Altera 公司的现场可编程门阵列 FPGA(EP1C 6)<sup>①</sup>设计了一种数字 PI 调节器<sup>[3]</sup>,通过建立 PI 输出和控制角的线性化函数,简化了控制程序。实验结果表明,本文设计的偏磁式消弧线圈数字式励磁调节器具有良好的动态性能,励磁电流能够快速地跟踪给定电流,满足消弧线圈快速补偿的要求。

## 1 数字式励磁调节器的数学模型

根据消弧线圈在不饱和状态时,其电抗值与励磁电流成线性关系,控制励磁电流即可控制消弧线圈的电抗值<sup>[4]</sup>,在电网发生单相接地故障时,要求快速投入消弧线圈,实现快速补偿,这就要求励磁系统必须快速、准确、稳定地提供励磁电流。偏磁式消弧线圈励磁系统<sup>[5]</sup>如图 1 所示(图中 1 为偏磁消弧线圈励磁绕组,2 为霍尔传感器,3 为电源变压器,4 为晶闸管全控整流桥),励磁电流由晶闸管全波整流电路<sup>[6]</sup>提供,由于消弧线圈控制绕组为大电感负载,所以不

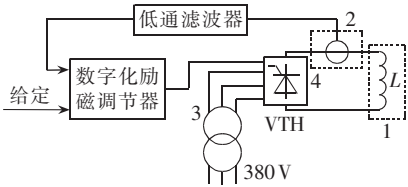


图 1 偏磁式消弧线圈励磁系统  
Fig.1 System of arc-suppression coil with magnetic bias

需要平波电抗器,由霍尔传感器、低通滤波器和数字化励磁系统构成对控制电流的闭环控制。

数字化励磁系统由控制芯片 DSP(TME320LF 2407)和 FPGA(EP1C 6)构成数字 PI 调节器和晶闸管脉冲触发器,励磁系统主结构<sup>[7]</sup>如图 2 所示。

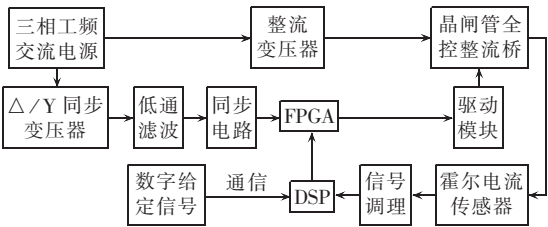


图 2 数字化励磁系统主结构  
Fig.2 Main structure of the digital excitation system

其中 DSP 主要完成采样、PI 调节和通信等功能,FPGA 主要用于生成晶闸管触发脉冲及触发保护等功能。PI 调节器是由比例、积分组合而成的调节器,比例环节可以提高调节器的动态响应速度,积分环节使调节器跟踪直流量,可以做到无静差。由于各消弧线圈控制绕组的阻抗值未知,而且在大电流通过时高温情况下阻抗值非线性变化,所以难以确定

全控整流桥负载电流和触发角的数学关系,为此,根据感性负载的导通角与控制角的关系  $\theta = \pi - \alpha$ ,经过数据标定,十进制数 2500 代表  $\pi / 2$ ,PI 调节器输出  $i_{piout}$  为开通量  $\theta$ ,则有  $\alpha = 2500 - K_i i_{piout}$ ,通过调节  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K$  即可得到触发角  $\alpha$ 。

2 系统设计

2.1 硬件设计

晶闸管触发系统由同步、移相、脉冲形成、脉冲放大等环节构成。其同步电路、采样通道调制电路和脉冲放大电路由模拟器件构成,移相和脉冲生成由 FPGA 及软件实现。

图 3 是 A 相同步电路,同步变压器二次侧电压  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  分别表示单相同步电路的输入电压,以 A 相为例, $u_a$  经过电压比较器输出宽度为  $180^\circ$ ,相差  $180^\circ$  的过零信号 TB\_A+ 和 TB\_A-,依此类推得到 TB\_B+、TB\_B-、TB\_C+、TB\_C-,其中 TB\_A+、TB\_B+、TB\_C+ 依次相差  $120^\circ$ ;6 路同步信号分别为整流桥 1~6 号晶闸管的触发基准信号。

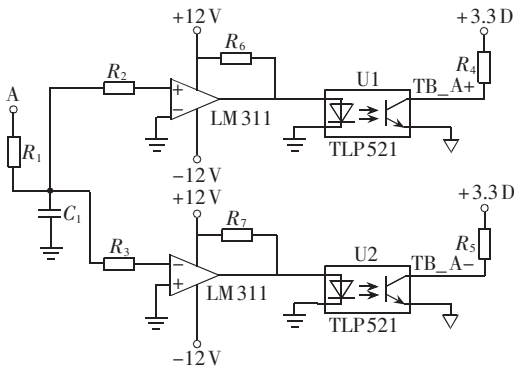


图 3 A 相同步电路  
Fig.3 Synch circuit of phase A

同步变压器移相角为  $0^\circ$ ,但是经过低通滤波器后移相角约为  $30^\circ$ ,因此,比较器输出的同步信号上升沿正好是晶闸管的自然换相点,即触发角为  $0^\circ$  处。依此类推,各同步信号的上升沿均为对应晶闸管的自然换相点。由于 FPGA 输出的数字脉冲是 TTL 电平,直接触发晶闸管功率不够,因此,必须经过脉冲放大环节<sup>[8]</sup>,如图 4 所示( $V_{TH1} \sim V_{TH6}$  分别为 1~6 号晶闸管的触发脉冲)。

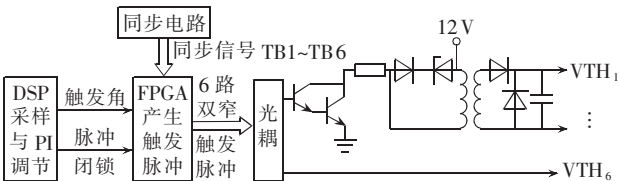


图 4 脉冲放大  
Fig.4 Trigger pulse amplification

脉冲功率放大单元输出双窄脉冲,对于全控桥,在向某一桥臂晶闸管发送一窄脉冲时,即同时向前一桥臂晶闸管补发一个窄脉冲,分别触发共阳极组和共阴极组的晶闸管,以此防止脉冲变压器饱和,降低触发电路的输出功率。

2.2 软件设计

2.2.1 DSP 模块设计

本系统中 DSP 主要基于 C 语言<sup>[9]</sup>开发 CAN 通信、励磁电流采样、数字 PI 调节、向 FPGA 模块写触发角等功能。

数字 PI 调节的输入设为  $e$ ,输出设为  $i_{piout}$ ,则有

$$i_{piout} = K_p e + K_i s_e, \quad e = i_{set} - i_{load}$$

其中  $s_e$  为  $e$  的累加; $i_{set}$  为给定电流值; $i_{load}$  为负载励磁电流值。由于偏磁式消弧线圈在高压下控制电感会反馈有零次及偶次谐波,因此, $i_{load}$  通过采样励磁电流多个点求取平均值获得,在此采样 20 个点,实验结果表明,可以比较准确地反映直流分量。

在 PI 调节器中引用积分环节的主要目的是消除静差、提高精度。但在过程的起动、结束或大幅度增减设定值时,若短时间内系统输出有较大的偏差值,会造成 PI 运算的积分积累,致使算得的控制量超过执行机构可能的最大动作范围对应的极限控制量,最终引起系统较大的超调,甚至引起系统振荡。因此,采用积分分离的 PI 算法:当系统偏差较大时,采用 P 调节,可使系统有较快的响应速度;当系统偏差较小时,采用 PI 调节,可保证控制系统的精度。其中积分分离的阈值  $\varepsilon$  可根据实际情况人为设定。由于负载是消弧线圈控制电感,触发角的范围为  $\alpha \in [0^\circ, 90^\circ]$ ,因此,根据 PI 调节后算得的触发角经数据标定后应限幅。采样和 PI 运算均通过 DSP 软件化,大大简化了硬件电路,且采样和 PI 运算均在 DSP 的采样中断程序中进行,而 DSP 的主程序只对一些参数进行初始化。主程序流程图如图 5 所示。

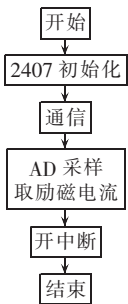


图 5 DSP 主程序流程图  
Fig.5 Flowchart of DSP main program

采样中断流程图如图 6 所示。

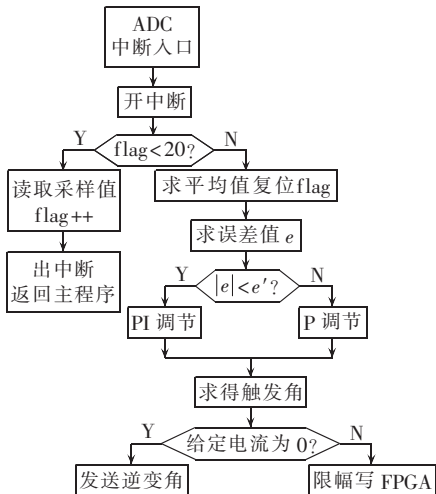


图 6 采样中断程序流程图  
Fig.6 Flowchart of ADC interruption program

### 2.2.2 FPGA 模块设计

FPGA 模块主要基于 VHDL<sup>[10]</sup>语言,完成信号隔离传输、逻辑运算和触发脉冲生成的功能,同步信号经光耦隔离后输入 FPGA 作为脉冲生成的基准信号,由软件实现晶闸管触发器的数字逻辑,大大简化了硬件电路,而且触发精度大大提高。

## 3 实验结果

对偏磁式消弧线圈进行实验, $\alpha=30^\circ$ 时的单相脉冲实验波形如图 7 所示。用 Tektronix 示波器记录的励磁电流从 0 A 上升到 45 A 的响应曲线如图 8 所示,PI 调节器实验参数值  $K_p=23.4$ , $K_i=11.72$ 。

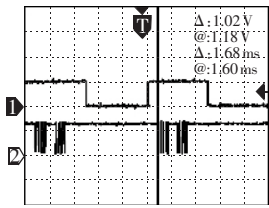


图 7  $\alpha=30^\circ$  单相脉冲实验波形  
Fig.7 Experiment waveform of single-phase pulse when  $\alpha=30^\circ$

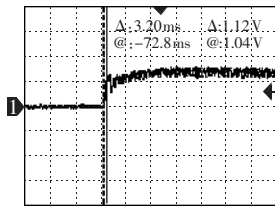


图 8 励磁电流响应曲线  
Fig.8 Response of excitation current

由图 8 可见,励磁电流没有稳态误差,动态响应时间约为 5 ms,符合设计要求。

## 4 结语

本文通过从自然换相点起采样励磁电流,并在下一个同期内触发晶闸管,另外通过对触发角和负载励磁电流的线性化处理,设计了一套 DSP 和 FPGA 的全数字化励磁调节器。实验表明,该励磁系统能够在 5 ms 内提供偏磁式消弧线圈励磁电流到最大值,满足偏磁式消弧线圈的控制要求。

### 参考文献:

[1] 蔡旭,刘杰. 偏磁式消弧线圈的动态调谐装置[J]. 电力系统自

动化,2002,26(15):53-56.

CAI Xu,LIU Jie. Dynamic resonance adjustment device of arc-suppression coil with magnetic bias[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(15):53-56.

[2] 王维俊,江渝,邓力. TMS320LF 240x DSP C 语言开发应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003.

[3] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2002.

[4] 蔡旭,谢桂林. 偏磁式消弧线圈工作机理研究(一)[J]. 华北电力大学学报,2000,27(4):7-12.

CAI Xu,XIE Gui-lin. Study on the theory of the arc-suppression coil with magnetic bias[J]. Journal of North China Electric Power University,2000,27(4):7-12.

[5] 蔡旭,李伟民. 自动跟踪电网电容电流动态补偿系统研究[J]. 电力系统自动化,1995,19(8):57-61.

CAI Xu,LI Wei-min. A study on the capacity current compensation system following the tracks of operating conditions of electric network[J]. Automation of Electric Power Systems,1995,19(8):57-61.

[6] 孙树朴,肖亮,王旭光,等. 半导体变流技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1994.

[7] 谭国俊,薛松,宋文祥. MCS-96 系列单片机 HSO 口在交直流调速系统中的应用[J]. 电气传动自动化,1998,20(2):44-47. TAN Guo-jun,XUE Song,SONG Wen-xiang. The application of MCS-96 microprocessor HSO port for DC (AC) drive system [J]. Electric Drive Automation,1998,20(2):44-47.

[8] 王兴伟,林桦,苏伟,等. 基于 DSP 的同步电动机数字式励磁调节器[J]. 电气传动自动化,2004,26(3):59-61.

WANG Xing-wei,LIN Hua,SU Wei,et al. Digital excitation regulator of synchronous motor based on DSP[J]. Electric Drive Automation,2004,26(3):59-61.

[9] 谭浩强. C 程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

[10] 侯伯亨,顾新. VHDL 硬件描述语言与数字逻辑电路设计[M]. 西安:西安电子科技大学,1997.

(责任编辑:李育燕)

### 作者简介:

邵国君(1978-),男,江苏镇江人,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动(E-mail:gjshao@gmail.com);

蔡旭(1964-),男,教授,博士,长期从事消弧线圈、电力电子装置及供用电安全自动装置的研究工作。

## Digital excitation regulator based on DSP and FPGA for arc-suppression coil

SHAO Guo-Jun,CAI Xu

(Shanghai Jiaotong University,Shanghai 200030,China)

**Abstract:** DSP(Digital Signal Processor) TMS320LF 2407 and FPGA(Field Programmable Gate Array) EP1C6 are used to design a digital PI(Proportional-Integral) regulator. The DSP realizes functions of sampling, PI regulation, communication and so on to digitally control the excitation current of arc-suppression coil with magnetic bias. The FPGA realizes functions of trigger pulse generation and trigger protection. Linear functions of the PI regulator output and the trigger angle simplify the control program and make the excitation current follow the set current quickly. The system hardware and software are introduced. Synchronization, phase shift, pulse generation and pulse amplification are involved in the thyristor trigger system. DSP and FPGA modules are developed with C and VHDL languages respectively. Flowcharts of the main program and the sampling interruption program are provided. The experiment shows that the dynamic response of excitation current is less than 5 ms, meeting requirements of arc-suppression coil with magnetic bias.

**Key words:** arc-suppression coil with magnetic bias; excitation current; PI regulator; DSP; FPGA