

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106356

基于FPGA的开关电源数字控制技术

郭文君 姜帆 贾立朋 华明 徐静

(中国电子科技集团公司第十四研究所 南京 210039)

摘要: 针对大功率移相全桥变换器进行研究,设计了该电路拓扑基于FPGA的数字控制方法。给出了开关电源系统控制策略,阐明了基于FPGA的数字PI算法、数字控制系统程序架构、及浮点运算的处理方法等电源数字控制系统多项关键技术。搭建了额定功率6 kW的数字控制电源样机,进行了多项功能性能试验,实现了开关电源预期设计指标。试验结果表明,基于FPGA的数字控制系统,不仅能够保证开关电源的稳定运行,在运算速度、事件并行处理等方面具有良好的性能。该技术不仅局限于移相全桥电路拓扑,通过适当调整调制及控制策略可应用于其他开关电源拓扑电路。

关键词: FPGA;数字控制;开关电源;移相全桥电路;PI算法

中图分类号: TN86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8

Digital control technology of switching power supply based on FPGA

Guo Wenjun Jiang Fan Jia Lipeng Hua Ming Xu Jing

(The 14th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210039, China)

Abstract: This paper studies the high-power phase-shifted full-bridge converter, and designs the FPGA-based digital control method for the circuit topology. The system control strategy of switching power supply is given, and many key technologies based on FPGA of the power supply digital control system such as digital PI algorithm, digital control system program architecture, and the method of processing floating-point operation are explained. A digital control power supply prototype with a rated power of 6 kW was built, a number of functional performance tests were carried out, and the expected design indicators of the switching power supply were achieved. Experimental results show that the FPGA-based digital control system can not only ensure the stable operation of the switching power supply, but also have great advantages in operation speed and event parallel processing. This technology is not limited to the phase-shifted full-bridge circuit topology, and can be applied to other switching power supply topology circuits by appropriately adjusting the modulation and control strategy.

Keywords: FPGA; digital control; switching power supply; phase-shifting full-bridge circuit; PI algorithm

0 引言

大功率开关电源在通信、新能源汽车、航空航天、军工等诸多领域应用广泛,是电子系统中必不可少的一部分^[1-4]。传统大功率开关电源采用模拟控制方式,随着技术进步,数字控制技术在开关电源中的应用正崭露头角,与模拟控制技术相比,电力电子电路采用数字控制技术具有如下优势:1)数字控制技术参数一致性好,可较大程度的避免误差、老化、温漂等问题;2)稳定性好,具有较高抗干扰能力;3)可以方便实现诸多高级、复杂的控制算法^[5-6]。

针对开关电源数字控制技术,通用型数字控制器有单片机、DSP、FPGA,三者各有特点,应用场景有所不同。单片机时钟频率较低,工作速度慢,不能满足开关电源高频化

发展趋势。与单片机相比,DSP的运算速度得到极大提高,应用DSP的数字电源具有较高的稳压精度和动态特性。FPGA较单片机、DSP具有更快的运算速度和更加丰富的逻辑资源,可以应用更加先进的控制算法,方便生成复杂控制驱动信号,应用于数字电源中,可使电源具有更好的瞬态响应。同时,FPGA抗干扰能力强,可应用于对系统设计严格要求、设备工作环境艰苦、易受干扰的场合^[7-11]。市场供应方面,目前国产化FPGA产品选择面广,基于FPGA的电源控制系统在具有严格国产化要求的应用领域具有较高的应用前景。

文献[12-13]分别针对反激变换器及BUCK变换器研究了基于FPGA的数字控制方法,讲解了软硬件基本设计

收稿日期:2021-04-11

思路。文献[14-17]阐述了基于FPGA的移相全桥电源数字控制技术,对移相全桥拓扑进行了详细描述,同时针对FPGA的最小系统组成、数字控制系统的原理框图以及各数字控制功能模块的基本实现方法进行了详细说明。但是,以上文献针对基于FPGA的开关电源数字控制技术的部分关键问题并未详尽描述,诸如数字控制系统完善的控制环路架构、各控制环路之间的约束、控制系统数据流的运行以及浮点数据运算的相关处理方法等关键问题。

本文采用国产化FPGA产品,设计了一款大功率全数字控制移相全桥电源样机,详细阐述了电源数字控制系统架构,针对关键问题进行了分析,同时进行了试验验证工作,取得了良好的效果。

1 移相全桥电源系统

图1为移相全桥电源系统,包括主功率电路部分和电源控制部分。

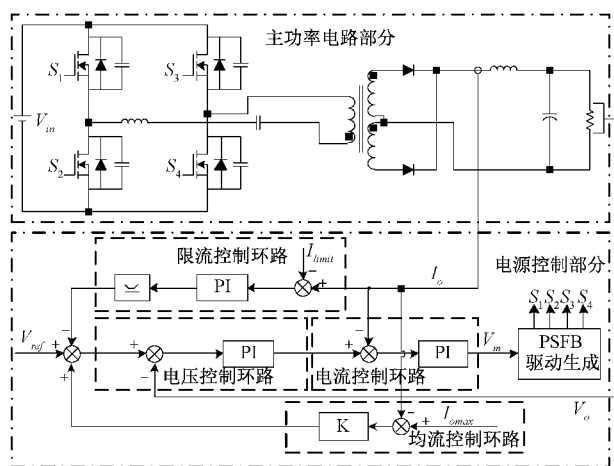


图1 移相全桥电源系统

如图1所示,电源控制部分包括电压控制环路、电流控制环路、限流控制环路以及均流控制环路。其中,电压控制环路与电流控制环路为主控制环路,限流控制环路与均流控制环路为辅助控制环路。辅助控制环路作为主控环路的外围控制环路其输出线性叠加到主控环路的输入端。

在本控制系统中,电源限流功能与均流功能通过改变电压控制环路输入参考值 V_{ref} 实现。限流控制环路的输出能力远大于均流控制环路,均流控制环路对电压参考值 V_{ref} 仅具有微调功能。在特殊工况下,限流控制环路的输出能够将电压参考值 V_{ref} 抵消至零值。

两辅助环路对控制系统稳定性至关重要,下文着重对限流控制环路与均流控制环路进行阐述。

1.1 限流控制环路

限流控制主要起过流保护作用,当负载异常时能够限制电源输出电流,使其最大输出电流稳定在限流值附近。该控制环路在电源正常运行过程中不起作用,其输出保持零值。当电源遇到类似负载短路情况时,输出电流突增,当

达到预设电流限幅值时,限流控制环路起作用,输出一负值,迫使电压控制环路的参考值 V_{ref} 降低,进而使输出电压降低。根据欧姆定理,当电压与电阻匹配时,电流值能够稳定在一恒定参考值。当限流深度进一步增加时,限流控制环路输出增大,输出电压更低,迫使输出电流保持在限流值附近。

1.2 均流控制环路

均流控制环路在多台电源并联运行时起作用。均流控制环路采集均流母线上最大电流值,该值与本机电流值进行比较,将差值做比例运算后,输出结果线性叠加到电压控制环路的参考值 V_{ref} 上。当本机电流与最大电流差值增大时,表明本机输出电流过小,此时均流控制环路输出增大,迫使电压控制环路输入参考值增大,从而提高输出电压。输出电压的提高促使电源输出更多电流,从而使并联的多台电源达到动态均流的效果。

2 数字控制系统

图1中给出的电源控制部分即为基于FPGA的电源数字控制系统要实现的部分,该部分包括信号调理及数据采集电路、FPGA运算单元、CAN通信接口电路及隔离驱动电路。本数字控制系统是以FPGA为基础的全数字控制高精度开关电源控制系统。在实际使用中要求其具有体积小、效率高、抗干扰能力强等特点,基于FPGA的数字控制系统如图2所示。

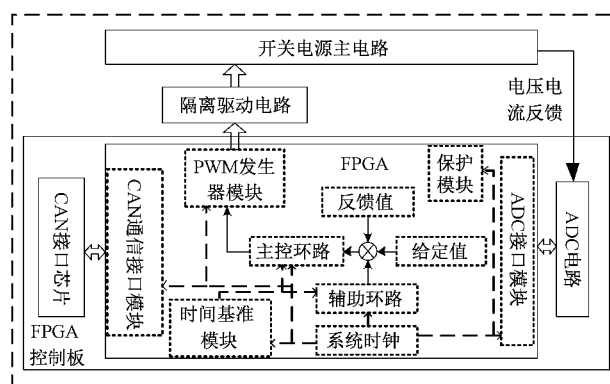


图2 基于FPGA的数字控制系统

FPGA运算单元作为数字控制系统的核心,其内部主要功能模块有数字PI控制器模块、PWM发生器模块、CAN通信接口模块、模数转换接口模块以及系统时钟模块等。

基本控制思路如下,FPGA通过外部调理电路、模数转换电路获取电源电压电流信号,然后将获取的数据通过辅助控制环路和主控环路的运算生成调制信号,该信号通过PWM发生器模块产生用于驱动开关管的脉冲信号。在主程序运行过程中,CAN通信接口模块以及保护模块同步并行运行,以保证电源有良好的对外信息交互能力以及实时故障保护功能。下面对控制系统的关键技术进行详细阐述。

2.1 数字 PI 控制器

在模拟控制系统中 PI 控制器是常用的控制算法^[18-19], 模拟 PI 控制器原理如图 3 所示。

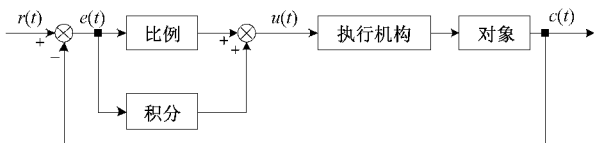


图 3 模拟 PI 控制器原理

PI 控制器是一种线性控制器, 它将参考值 $r(t)$ 与实际输出值 $c(t)$ 做差得到偏差量 $e(t)$, 通过偏差量求得比例、积分, 比例与积分的线性组合构成控制量 $u(t)$ 。PI 控制器的微分方程为:

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

其中, K_p 为比例系数, T_I 为积分时间常数, $e(t)$ 为偏差, $u(t)$ 为控制量。

比例控制能迅速反应误差, 从而减小误差, 但是比例控制不能消除稳态误差; 积分控制可以消除稳态误差, 只要有误差存在, 积分作用就会不断累积, 因而只要时间足够, 误差能够完全消除。比例控制与积分控制的相互配合, 能够使系统具有较好的控制效果。

数字 PI 控制器的差分方程如式(2)所示。

$$u(k) = K_p \left[e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) \right] = up(k) + ui(k) \quad (2)$$

其中,

$$up(k) = K_p e(k) \quad (3)$$

$$ui(k) = K_p \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) \quad (4)$$

式(3)为比例项, 式(4)为积分项。在 FPGA 中, 计算 PI 控制器需采用时序逻辑进行运算, 其运算流程如图 4 所示。

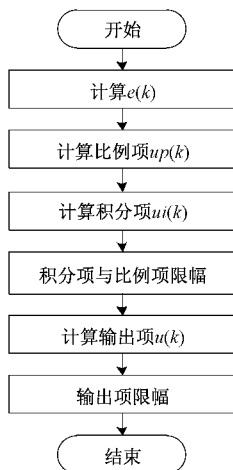


图 4 数字 PI 控制器运算流程

PI 控制器的运算周期可通过调试获得较为优化的结果, 每次运算的开启信号由时间基准模块产生。在时间基准模块的触发下, 主控环路与辅助环路依据逻辑顺序实现流水线运行。

2.2 基于 FPGA 的数字控制程序架构

与 C/C++ 等编程语言不同, Verilog HDL 用于电路描述, 综合之后代表着逻辑门电路和触发器的组合。FPGA 上电后, 每个功能电路按照自己的条件执行, 不会因为某个功能模块的代码放在前面就先执行。

基于 FPGA 的电源数字控制系统, 其各功能部分既存在前后相接的顺序执行关系, 又存在并行运行关系。由电源系统图可知, 在主回路控制部分, 辅助控制环路中的限流控制环路与均流控制为并行信号流处理关系, 以上两个控制环路与主控制环路是顺序信号流处理关系, 同时, 主控环路内部的电压控制环路与电流控制环路为顺序执行关系。

为保证以上运算次序的环环相扣, 避免数据流冲突, 每个功能模块采用时序逻辑, 用状态机控制每一个寄存器的跳变。同时, 为整个系统配置“时间基准”模块, 该模块控制着其他功能模块开启数据流处理的先后次序。只有该模块对应功能模块触发信号有效, 相应的功能模块才能在系统时钟的触发下一步一步执行, 这样就能够保证系统的稳定运行, 图 5 所示为各模块在一个完整运算周期中的工作时段与先后次序。

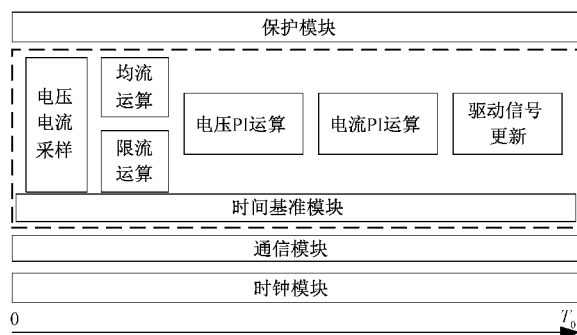


图 5 FPGA 程序工作流程

假定程序由信号采样到 PWM 信号一次更新完成所用时间为一个运行周期 T_0 。由图 5 可知, 保护模块、时间基准模块、通信模块以及时钟模块在一个运行周期内始终在工作。电压电流采样、均流运算、限流运算、电压 PI 运算、电流 PI 运算、驱动信号更新在时间基准模块的引导下, 按先后次序, 分时工作。这种数字控制程序架构一方面确保了监控与通信功能的实时性, 另一方面保证信号流按照预定逻辑被处理。由此可得, FPGA 的这种“并行操作与顺序操作共存”的程序架构在实时处理系统上较单片机、DSP 拥有更大优势。

2.3 浮点运算处理方法

在数字控制系统中不可避免的会遇到浮点数运算的场景, 然而, 在 FPGA 的编译环境中使用 Verilog HDL 进行

编程时,变量统一定义为REG类型,并没有类似C语言中整型、浮点型、字符型等变量类型的区分。由此,浮点类型数据的运算无法轻易实现,当然亦可以使用FPGA厂家提供的IP实现浮点运算,但运用起来并不够方便。

为避免浮点运算同时保证数据的运算精度,在此使用“倍数扩大”的方法,同时该倍数为2的指数。“倍数扩大”法是指将用于运算的两个变量进行2的指数倍扩大,扩大后的数据进行相应的数据运算,最后对运算结果进行相应的倍数缩小。“倍数扩大”法能够大大简化程序复杂度,同时又能够保证足够的运算精度。

3 试验结果及其分析

本文设计了一款6 kW移相全桥数字控制开关电源,运用CAN通信实现电源的开关机控制及状态查询功能。电源主要参数如表1所示。

表1 数字控制电源主要参数表

电源参数	量值
输入电压/V	180~350
输出电压/V	60
额定输出电流/A	100
恒流点/A	115
输出电压纹波/mV	≤200

基于FPGA的数字控制板实物如图6所示。

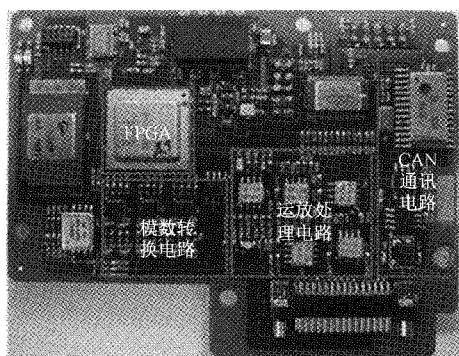


图6 数字控制板实物

为验证数字控制系统的有效性,本文针对全数字控制样机进行了长时间拷机试验及多种工况运行试验,多工况运行试验包括带载启动试验、输出短路启动试验、负载突变试验、恒流试验。

图7是带载启动试验输出电压波形图,输出电压由0~60 V用时约为500 ms,启动过程中输出电压线性增加,没有出现输出过冲现象。

图8是输出短路启动试验输出电压波形图,电子负载设置为恒阻模式,电阻设置为50 mΩ,电子负载电流与功率门限设置为最大(试验中电子负载电流门限1 000 A,功率门限为14.4 kW,完全能够满足试验需求)。

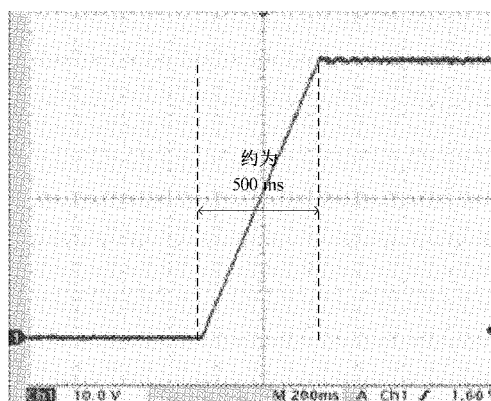


图7 带载启动试验输出电压波形图

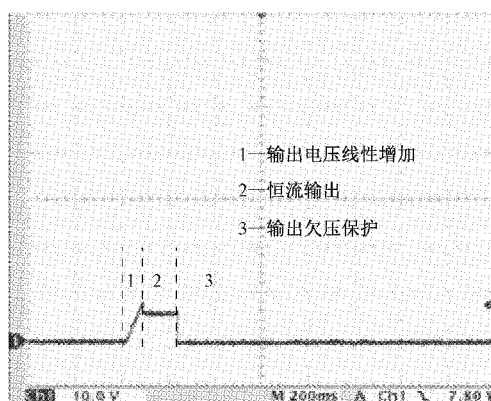


图8 输出短路启动试验输出电压波形图

由图8可知,电源短路启动可以分为3个阶段,第1阶段为线性上升阶段,第2阶段为限流阶段,第3阶段为保护关机阶段。在第1阶段,由于输出电压低,电源尚未进入限流状态,因此输出电压线性增加。当电压增加到一定值时,电流达到限流幅值,此时进入第2阶段,输出电压不变,电源限流。限流一定时间,电源欠压保护启动,电源关机,输出电压降为0 V。由图8可知即使在短路情况下启动电源,电源亦不会损坏。

图9为负载突变试验输出电压波形图,在电源运行过程中,负载电流由0 A突然变为100 A。由图9可知,在突

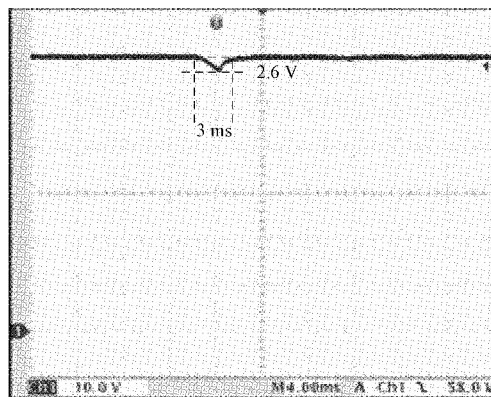


图9 负载突变试验输出电压波形图

加负载的过程中,输出电压跌落 2.6 V,约占额定输出电压值的 4.3%,输出电压恢复时间为 3 ms,电源具有良好的动态特性。

图 10 为恒流试验输出电压波形图,电源运行过程中,在负载突变点 1,负载由 0.6 Ω 突变为 0.42 Ω ,输出电流突增并达到限流值,此时电源输出电压顺势降低以维持恒流运行。在负载突变点 2,负载由 0.42 Ω 突变为空载,此时输出电压恢复,电源脱离恒流运行状态。由图 10 可知,在电源脱离恒流状态时,输出电压过度平滑,未出现过冲现象。

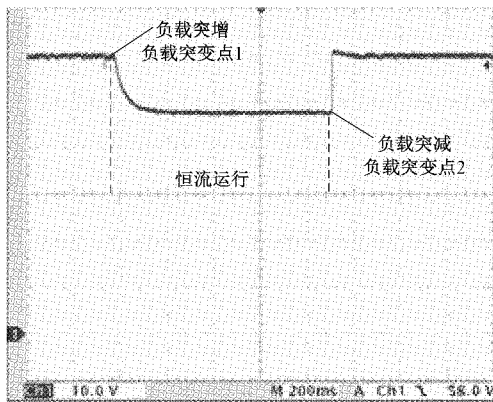


图 10 恒流试验输出电压波形图

4 结 论

本文以 FPGA 为控制核心,设计了数字化大功率开关电源,并通过试验验证了本文研究的电源数字控制系统具有稳定性好、控制精度高、响应快等诸多优点。FPGA 接口兼容性好,运算速度快,抗干扰能力强,针对不同应用需求可以进行灵活设置和修改,随着电源数字化进程的推进,其具有较高的应用优势。程序在线更新功能便于后期应用维护,本文尚未做研究,后期将针对该方面内容进一步研究。

参考文献

- [1] 施凯敏. 移相控制高压输出 DC-DC 变换器研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
- [2] 岳鹏. 大功率开关电源主电路研究[D]. 广州:华南理工大学, 2010.
- [3] 朱学政,张一鸣,张玉涛. 基于 ZVS 软开关技术的 30 kW 大功率开关电源设计[J]. 电气自动化, 2016, 38(2):20-21,40.
- [4] 瞿才鑫. 数控直流开关电源的设计与实现[D]. 武汉:

华中科技大学, 2013.

- [5] 常昌远,徐兵,杨洋. 一种用于数字电源的改进型延迟环 ADC 设计[J]. 电力电子技术, 2010, 44(12):44-46.
- [6] 邱楹,陈希有,仲崇权,等. 全负载 DC-DC 变换器电荷平衡数字控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 40-47,17.
- [7] 卢少锋. 基于 FPGA 的高效 DC/DC 数字电源设计研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2018.
- [8] 宋宇飞,宋黎定,苗三立,等. 基于 FPGA 的 PLC 高速计数模块设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(9): 210-215.
- [9] 陈源林,孙尚民,许西宁. 基于 FPGA 和 STM32 的多通道超声信号同步采集系统设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(11):142-147.
- [10] 杨坤,王志斌. 基于 FPGA 的数字程控中频放大电路设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(2):111-117.
- [11] 翟华,闫梦飞,吕庆洲,等. 组合 FPGA 光电传感器阵列的顶管机激光姿态测量系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7):50-57.
- [12] 卢诚. 基于 FPGA 的 DC-DC 数控电源设计与实现[D]. 淮南:安徽理工大学, 2019.
- [13] 高凡凡. 基于 FPGA 控制的 DC-DC 变换器的研究[D]. 西安:西安科技大学, 2012.
- [14] 王亮. 基于 FPGA 数字移相全桥软开关通信电源设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2016.
- [15] 房志东. 基于 FPGA 高频数字开关电源的开发[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2014.
- [16] 单智. 大功率移相全桥数字直流电源的设计[D]. 天津:河北工业大学, 2016.
- [17] 潘泽跃. 基于 FPGA 特种电源的研制及控制算法的应用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2016.
- [18] 张猛,李军,王新刚,等. 全光纤电流互感器 PID 控制算法研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(12):156-159.
- [19] 郑车晓,燕沙,谢立海,等. 单相 H 桥整流器的模糊 PI 控制实现[J]. 电力电子技术, 2019, 53(11):42-45.

作者简介

郭文君,工学硕士,主要研究方向为大功率直流开关电源技术。

E-mail:guowenj@aliyun.com

姜帆,工学硕士,主要研究方向为航空电源技术。

E-mail:SSS_DYS@163.com