

文章编号: 1674-9057(2015)02-0391-06

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2015.02.029

一种基于 STM32F103 的高隔离度 可调直流稳压电源设计

蒋存波, 徐和飞

(桂林理工大学 信息科学与工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 选择三重绝缘线绕制 DC/DC 逆变桥升压隔离型变压器, 原副边间再增加 2 层聚酰亚胺夹 1 层 NOMAX 绝缘纸可实现电源的高隔离。由板级嵌入式控制电路对 DC/DC 逆变桥和 Buck 调压电路进行控制, 实现输出电压的调压和稳压控制, 各级联模块作为从节点通过 RS485 接口和 ModBus 协议构成主从式现场总线网络, 在主嵌入式模块的管理下协调工作。经测试电源可满足绝缘脉冲电应力加速老化试验的要求。

关键词: 嵌入式系统; 隔离开关电源; 现场总线

中图分类号: TN86

文献标志码: A

当前 PWM 控制方式应用日趋普遍, 在这些应用中施加在电气设备绝缘系统 (electrical insulation systems, EIS) 或电气设备绝缘材料 (electrical insulation material, EIM) 上的是持续的高压脉冲电压, EIS/EIM 承受的电应力较直流和工频正弦交流电要严酷的多, 以往直流和工频正弦交流电压下 EIS/EIM 电性能和电老化测试的实验设备已不能完全满足新的应用环境的需要^[1-4]。脉冲电应力 EIS/EIM 电性能实验需要重复频率、脉冲幅值、占空比、脉冲边沿电压上升/下降率可控的脉冲电源。由于高速电力电子器件电压的限制 (用常规逆变桥只能产生 500 V 峰值、脉冲沿时间上升快速且稳定、脉冲参数稳定一致的脉冲电压), 当前还难以用一级逆变桥直接获得 5 kV 及以上电压幅值的连续高性能脉冲。多个 500 V 逆变模块级联是获得 EIS/EIM 电性能实验用高性能高压脉冲的一种有效方法, 这种方法需要高隔离度、低耦合电容可调直流电源。开关电源具有体积小、质量轻、耦合电容小的优点, 主要应用于输出电压固定或小范围调整的领域, 提高可靠性和效率、减

小体积、降低纹波、减小 EMC、模块化等是其主要研究方向^[5-6]; 孙鹏菊对恒功率可调输出开关电源进行了研究, 研制出了输出电压 40 ~ 600 V 可调的恒功率开关电源, 但它不适用于 EIS 脉冲电应力加速老化实验的负载特性^[7]; 刘雪等介绍了一种单片机控制的 2 ~ 15 V 可调开关电源^[8]; 胡蓬峰等利用继电器切换脉冲变压器副边绕组再配合 PWM 占空比调节实现了功率为 650 W、145 ~ 730 V 可调直流电源^[9], 但其不能满足 EIS 加速老化级联式脉冲电源所需要的可以由主控制器通过现场总线对多个电源模块进行协调控制的要求。嵌入式及现场总线技术在工业和智能家居等领域得到广泛应用^[10-11], 将其应用于 EIS 加速寿命实验级联脉冲源的直流开关电源, 可以使其满足负载特性具有非线性、多模块协调控制的功能要求。

1 设计要求与设计方案

依据实验要求, 脉冲电源电压在 500 V ~ 6 kV 可调, 脉冲重复频率在 1 ~ 20 kHz 可调, 脉冲边沿电压变化率在 $1 \times 10^8 \sim 1 \times 10^{10}$ V/s, 对称双极性脉

收稿日期: 2014-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51167004); 广西自然科学基金项目 (2013GXNSFBA019250; 2011GXNSFA018022)

作者简介: 蒋存波 (1962—), 男, 教授, 研究方向: 嵌入式系统及应用、自动检测与控制装置、计算机应用, jiangcunbo@163.com。

通讯作者: 徐和飞, 副教授, xu_hefei@163.com。

引文格式: 蒋存波, 徐和飞. 一种基于 STM32F103 的高隔离度可调直流稳压电源设计 [J]. 桂林理工大学学报, 2015, 35 (2): 391-396.

冲, 单边脉冲占空比 10% ~ 50% 可调。由于单个快速逆变桥难以获得所需要的电压幅值, 脉冲变压器升压又会造成脉冲边沿变差、影响脉冲电源参数的一致性、稳定性, 因此采用多模块级连方式。

1.1 级联式脉冲电源对电源的基本要求

级联式脉冲电源如图 1 所示。第 k 个脉冲模块由高隔离度电源模块 IPS_k 和脉冲逆变桥 PIB_k 构成 ($k = 1, 2, \dots, n, n$ 与最大脉冲峰值 U_p 有关, $n = U_p/500$)。第 k 个隔离电源 (isolated power supply, IPS) IPS_k 中的板级嵌入式控制器 (board-level embedded controller, BEC) 与嵌入式主控制装置 (embedded host controller, EHC) 利用 RS485 构成现场总线网络, 使用 ModBus 协议的 ASCII 报文格式传送控制命令和状态信息。 IPS_k 接收 EHC 的控制指令实现各 IPS 模块的协调控制, 利用 220 V 交流市电产生高隔离度辅助电源 U_{Fk} 和高隔离度可调直流电源 U_{Hk} 。

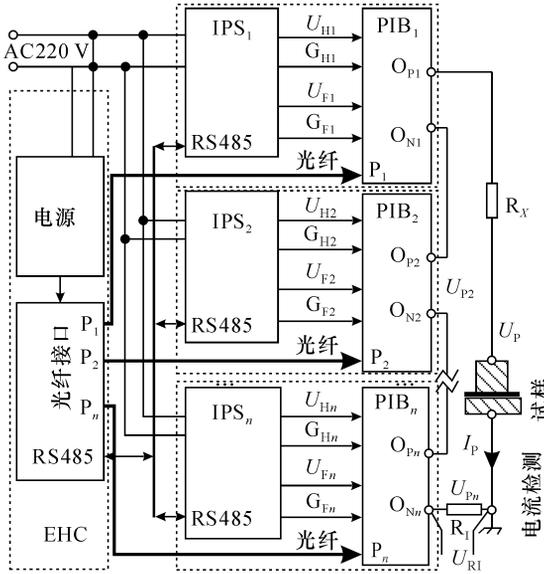


图 1 级联式脉冲电源原理

Fig. 1 Principle diagram of the cascading pulse power

按需要级联的 n 个脉冲逆变桥 $PIB_1 \sim PIB_n$ 利用 U_{Fk} 产生工作用辅助电源, 在 EHC 的脉冲同步控制信号 P_k 控制下工作于同步逆变状态, 将 U_{Hk} 逆变为相位、周期、占空比均相同、脉冲幅值为 U_{Pk} 的对称双极性脉冲电压, 使用光纤高隔离度不失真地传送 EHC 产生的脉冲同步逆变控制信号 P_k 。 n 个脉冲逆变模块级联得到总输出脉冲电压幅值 $U_p = \sum U_{Pk}$ 。设每个逆变模块的脉冲最大脉冲峰值为

U_{Hmax} , 通过选择级联模块数 n 可以方便地构成所需最大脉冲峰值为 $U_{pmax} = n \times U_{Hmax}$ 的对称双极性脉冲电源。为了实现 n 个模块级联, 要求 IPS_k 具有 $4 \times n \times U_{Hmax}$ 的耐压。笔者选择 $U_{Hmax} = 500 \text{ V}, n = 8$, 要求 IPS_k 的输入输出端隔离 (绝缘) 电压不低于 16 kV, 电压在 50 ~ 500 V 可调, 功率不低于 650 W^[14]。

1.2 电源的总体技术方案

采用两级结构, 用隔离型 DC/DC 获得 550 V 高隔离直流电压 U_{HA} , 再利用 Buch 结构 PWM 电路调压的方案, 电路原理如图 2 所示。

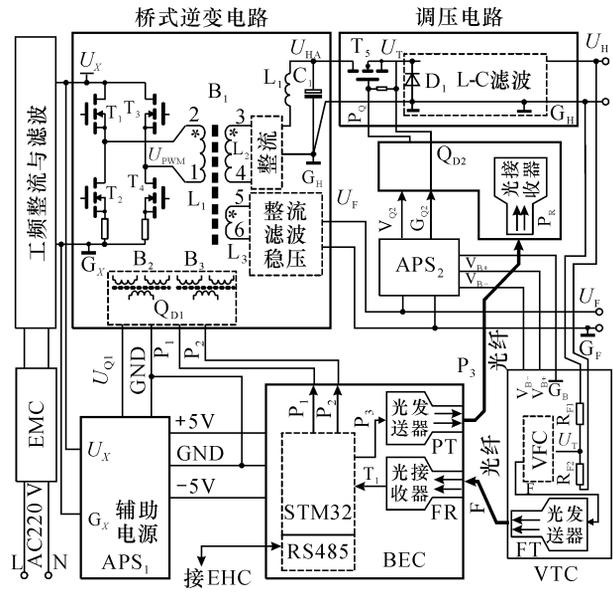


图 2 高隔离度可调直流电源 IPS 原理

Fig. 2 High isolation degree of adjustable DC power supply principle diagram of the IPS

图 2 中的桥式逆变电路在 BEC 的 PWM 信号 P_1 和 P_2 控制下进行 DC/DC 变换, 将工频整流后的直流电压 U_X 逆变为脉冲电压 U_{PWM} , 由高隔离脉冲变压器 B_1 隔离传送到副边。 B_1 升压绕组 L_2 的输出脉冲经整流滤波得到约 550 V 的直流电压 U_{HA} , 降压辅助绕组 L_3 输出的脉冲经整流滤波得到约 24 V 的辅助直流电压 U_F 。输出电压 U_H 由电阻 R_{F1} 和 R_{F2} 分压得到电压检测信号 $U_T = U_H/100$, 电压检测电路 VTC 的 VFC 将 U_T 线性转换为频率信号 F , 由光发送器 FT 转换成光信号通过光纤隔离传送到 BEC 光接收器 FR, 由 BEC 接收 FR 输出的脉冲 F , BEC 中嵌入式处理器的通用定时器测量脉冲频率或周期实现对 U_H 的高隔离度检测。全部 n 个模块的 BEC 和 EHC 利用 RS485 接口构成主从式现场总线网络, EHC 作为主节点, 所有 BEC 作为从节点, 使用

ModBus 协议的 ASCII 报文格式。BEC 依据命令报文给出的电压设定值与 U_H 检测值的偏差控制 P_3 的脉冲宽度,构成 U_H 闭环控制系统,实现输出电压 U_H 的调压与稳压控制。

1.3 关键电路

关键电路包括板级嵌入式控制电路 BEC、调压电路、高隔离桥式逆变 DC/DC 电路和高隔离电压检测电路 VTC。

(1) 高隔离 DC/DC 电路。隔离 DC/DC 电路主要是高隔离脉冲变压器。高隔离脉冲变压器 B_1 使用 EE55C 磁芯配卧式骨架,绕组使用三重绝缘电磁线(击穿电压不小于 15 kV)绕制,原边绕组 L_1 绕制在最内层,主副边绕组 L_2 绕制在 L_1 外, L_1 和 L_2 之间另加 2 层 0.03 mm 聚酰亚胺膜(击穿电压 5 kV)中间夹 1 层 0.35 mm 的 NOMAX 绝缘纸(击穿电压 18 kV)构成的绕组间绝缘结构,可满足 20 kV 绝缘要求。辅助副边绕组 L_3 绕在 L_2 外, L_3 与 L_2 之间垫 1 层 0.35 mm 的 NOMAX 绝缘纸绝缘。

(2) 板级嵌入式控制器 BEC。BEC 以 STM32F103C8 为核心,电路原理如图 3 所示。

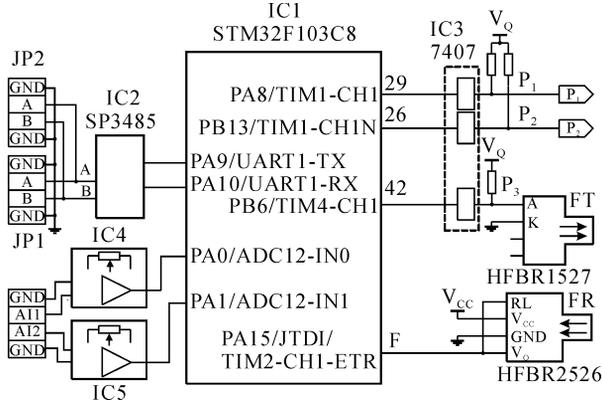


图3 板级嵌入式控制器 BEC 电路原理

Fig.3 Board level BEC embedded controller circuit principle diagram

由高级定时器 TIM1 输出两路互补且带死区的 PWM 控制信号 P_1 和 P_2 控制 DC/DC 逆变桥, P_1 和 P_2 的频率为 50 kHz,通过设置 0.5 ~ 2 μ s 死区保证逆变桥可靠工作。光接收器接收光纤隔离传送的 VFC 脉冲信号并转换为电信号 F,用 TIM2 - CH1 - ETR 的计数功能检测 F 的频率或周期从而实现 U_H 的隔离检测。定时器 TIM4 - CH1 产生 PWM 控制信号 P_3 , P_3 的频率选择为 100 kHz,依据输出电压偏差使用软件实现数字 PI 控制算法确定 PWM 脉冲宽度,由 P_3 控制调压电路的 T_5 实现

电压 U_H 的调压与稳压控制。串行通信接口 UART1 的 RX 和 TX 信号由 IC2 (SPS 3485) 转换为 RS485 信号。

(3) PWM 调压电路(图 4)。光纤隔离传送的 P_3 信号由光隔离驱动电路 QD2 隔离驱动,其输出信号 P_Q 驱动 T_5 ,将 550 V 直流电压 U_{HA} 转换为周期为 T 、脉冲宽度为 T_{ON} 的 PWM 脉冲 U_{HP} ,经 L-C 滤波得到最终可调的高隔离直流电压 $U_H = D \times U_{HA}$ ($D = T_{ON}/T$)。电源 U_H 的额定负载电流 1.5 A,最小负载电流 0.15 A。为获得满意的调压性能,要求在最小脉冲宽度、最小负载电流下电感电流连续,输出电压稳定。

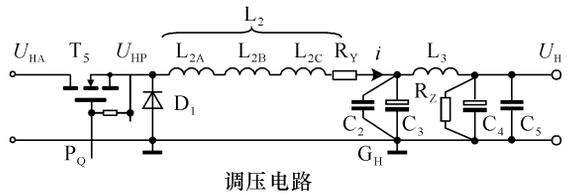


图4 PWM 调压电路

Fig.4 PWM voltage regulation circuit

在 T_5 导通时,需要输出电压 U_H 稳定,电感 L_2 上电压 $L_2 \cdot di/dt = U_{HA} - U_H$ 基本恒定,因此电感 L_2 中的电流从初值 I_{01} 线性增大, $i = I_{01} + (U_{HA} - U_H) \cdot t/L_2$,在脉冲终了时刻($t = T_{ON}$)电流达到最大值 I_{02} 。

$$i(T_{ON}) = I_{02} = I_{01} + (U_{HA} - U_H) \frac{D \cdot T}{L_2} \quad (1)$$

在 $t = T_{ON}$ 后 T_5 截止,电感 L_2 经过二极管 D_1 续流,考虑二极管导通压降 $V_{D1} \approx 1$ V,远小于输出电压最小值 U_{Hmin} (50 V),电感电压 $L_2 \cdot di/dt = U_H + U_{D1} \approx U_H$,电感电流从 I_{02} 开始线性下降(以 T_5 截止时刻作为时间基准), $i = I_{02} - U_H \cdot t/L_2$,在 1 个 PWM 周期终了时刻 $t = T - T_{ON} = (1 - k)T$,电流达到最小值 I_{01} :

$$I_{01} = I_{02} - \frac{U_H}{L_2}(1 - D)T \quad (2)$$

电流平均值用 I_E 表示,若电源稳定,则 $I_{02} = I_E + I, I_{01} = I_E - I$ 。由式(1) ~ 式(2)并利用 $U_H = D \cdot U_{HA}$ 整理后得到

$I_{02} - I_{01} = 2\Delta I = U_{HA} \cdot (1 - D)T/L_2$,使得电流波动不大于 ΔI 的电感 L_2 应该满足 $L_2 \geq U_{HA} \cdot (1 - D)T/2\Delta I$ 。选择 $\Delta I = 0.9I_E$,电流最小值

$I_{01} = 0.1I_E, I_{02} = 1.9I_E$, 可得

$$L_2 \geq U_{HP} \frac{(1-D)T}{1.8I_E} \quad (3)$$

本电源要求 $I_{Emin} = 0.15 A, D_{min} = 0.1$, 周期 $T = 10 \mu s, L_2 \geq 19 mH$ 。为满足最小电流时电感不小于 $19 mH$, 大电流时电感不饱和、最小电感不小于 $1 mH$, 将 L_2 分解为 L_{2A}, L_{2B}, L_{2C} 共 3 个电感, 使用铁硅铝磁环 (KS184 - 125A, $AL = 281 nH/N^2, N$ 为线圈匝数), 用直径 $0.65 mm$ 的漆包线绕制, 其中 $L_{2A} \approx 11 mH (190 T), L_{2B} \approx 6 mH (145 T), L_{2C} \approx 2 mH (85 T)$, 在电流小于 $0.5 A$ 时, 3 个电感磁芯均不饱和, 总电感 $L_2 = 19 mH$, 电流 $0.5 A < I_E < 1 A$ 时 L_{2A} 开始进入饱和区 (非线性区) 电感量下降, 这时总电感 $L_2 > 10 mH$, 电流 $1 A < I_E < 1.5 A, L_{2A}$ 进一步趋向饱和且 L_{2B} 也开始进入磁性曲线饱和区, 电感量减小, 这时总电感 $L_2 > 3 mH$, 这样既保证了小电流和大电流下对滤波电感值的要求, 又可避免使用太大的磁芯。选择电容 $C_2 = 100 nF/1000 V$, 瓷片电容; $C_3 = 4 \times 330 \mu F/600 V$, 电解电容; $C_4 = 10 \mu F/600 V$, 电解电容; $C_5 = 100 nF/630 V$, CBB 电容。

(3) 输出电压高隔离检测电路。高隔离输出

电压 U_H 的高隔离电压检测电路如图 5 所示。

输出电压 U_H 由电阻 R_{F1} 和 R_{F2} 衰减约 $1/100$ 得到 V_F , 由高共模抑制比电路 IC8 抑制共模信号, 由 IC7 进行增益调整得到 $0 \sim 5 V$ 的输出信号 U_2 , 电压 U_2 由 VFC320 转换为 $0 \sim 500 kHz$ 的脉冲信号 F, 通过光纤传送到 BEC 电路。

1.4 调压电路的控制

图 2 的桥式逆变电路为恒压输出开关电源, 输出电压 $U_{HA} = 550 V$ 。在图 4 的 P_Q 端施加恒定占空比 PWM 脉冲测试 U_H 为衰减振荡过程, 可以用二阶模型近似描述:

$$G_0(S) = \frac{K \cdot \omega_n^2}{S^2 + 2\xi \cdot \omega_n \cdot S + \omega_n^2} \quad (4)$$

由于图 4 中 L_2 随电流变化, 参数 ξ (阻尼系数) 和 ω_n (无阻尼自振频率) 也随之变化。由 BEC 使用比例控制算法实现调压电路闭环控制。

2 程序设计

控制程序主要功能: (1) 对 STM32F103C8 初始化, 设置 TIM1 为 $50 kHz$ 、死区 $1 \mu s$ 的互补 PWM; TIM4 - CH1 为 $100 kHz$ 、单 PWM 输出方式;

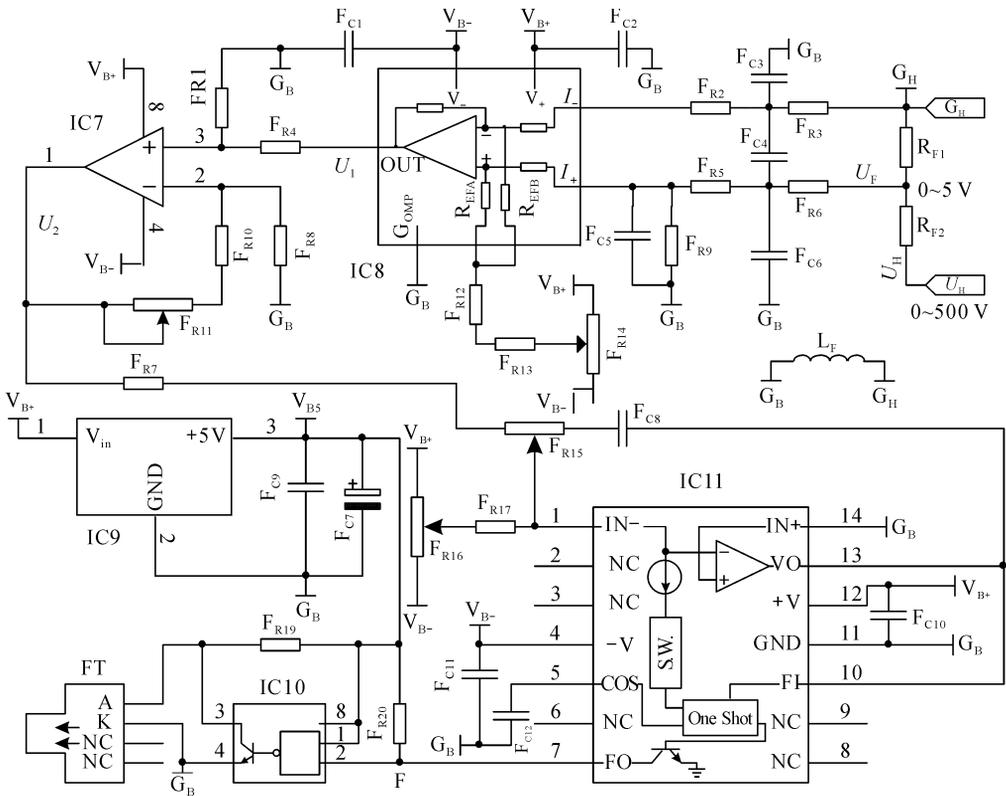


图 5 高隔离度输出电压检测电路

Fig. 5 High isolation degree of output voltage detection circuit

(2) 设置 TIM2 - CH1 为外部脉冲计数方式,用于实现高隔离输出电压 U_H 检测,计数脉冲为从 ETR 引脚输入的光纤隔离传输的输出电压 U_H 的 VFC 脉冲 F;(3)设置 UART1 波特率 38 400,8 位数据位,1 位停止位,偶校验。中断方式接收,查询方式发送,使用 ModBus 协议 ASCII 报文格式,一旦接收到接收 EHC 的命令和参数报文,则设置标志符 RX_F = 0x5A, 否则 RX_F = 0x00。EHC 通过点对点的参数报文分别设置每个 BEC 的电压值或者读取各指定 BEC 的数据报文,通过广播方式发送启动命令和停止命令报文;(4)调压稳压控制使用积分分离的数字 PI 算法。系统主程序流程框图如图 6 所示。

源程序使用 C 语言并结合 STM32F103 固件库编写,控制程序目标代码写入 STM32F103C8 的片内 Flash。

3 实验测试

3.1 开关电源测试

由 BEC 控制桥式隔离 DC/DC 电路使 $U_{HA} = 550\text{ V}$, 在图 4 电路 P_Q 端分别施加占空比 D 为 10% ~ 90% 的开环 PWM 控制信号,使用 FLUKE111 表直流电压档测量 U_H , 测试数据见表 1。由 BEC 执行比例控制算法产生闭环 PWM 控制信号,实验结果见表 2。

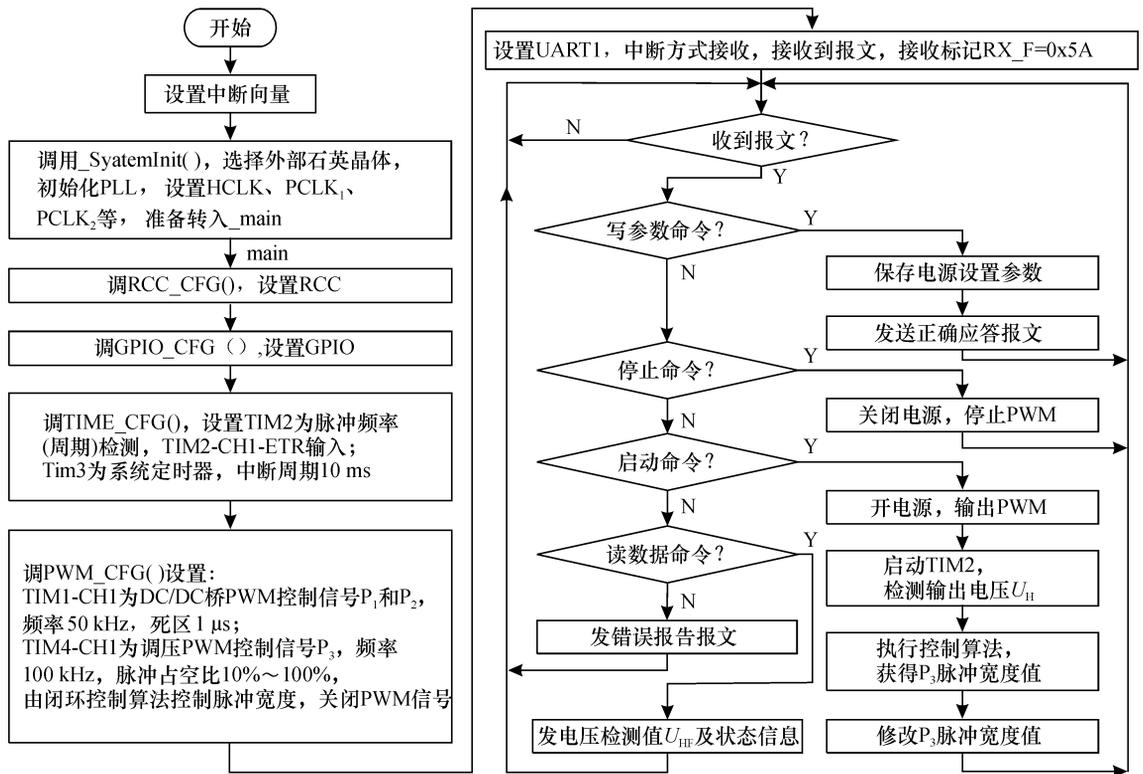


图 6 主程序流程框图

Fig. 6 System of the main program flow diagram

表 1 不同负载下输出电压与占空比关系

Table 1 Output voltage and duty ratio under different loadings

D/%	10	20	50	80	90
期望电压/V	55	110	275	440	495
负载 $R_L = 200\ \Omega$					
输出 U_H /V	29.4	98.5	272.1	435.6	494.5
负载 $R_L = 1\ \text{k}\Omega$					
输出 U_H /V	31.2	99.4	273.8	437.2	495.6
负载 $R_L = 10\ \text{k}\Omega$					
输出 U_H /V	31.5	99.7	274.5	438.5	496.8

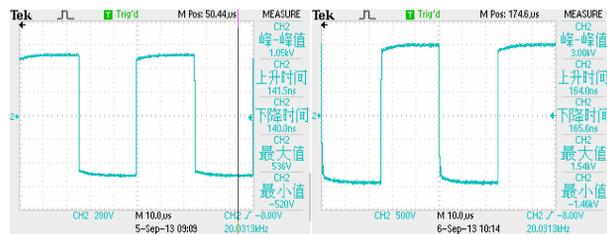
表 2 不同负载闭环输出电压

Table 2 Different loading loop output voltage

设定值/V	50	100	200	300	400	500
负载 $R_L = 200\ \Omega$						
输出 U_H /V	49.5	99.2	201.5	298.8	401.5	498.5
负载 $R_L = 1\ \text{k}\Omega$						
输出 U_H /V	51.5	100.8	201.7	301.6	402.2	502.1
负载 $R_L = 10\ \text{k}\Omega$						
输出 U_H /V	51.2	98.9	201.5	302.1	397.8	498.1

3.2 脉冲电源级联实验

在图1中利用本开关电源构成的脉冲电源如图7所示。使用泰克TDS2012B示波器测量,对称双极型方波,脉冲频率设定值 $f=20\text{ kHz}$ 。



(a) 单个脉冲模块波形

(b) 3个模块级联波形

图7 脉冲电源波形

Fig. 7 Pulse power waveform

经测试电路能可靠运行,调压稳压电路L-C滤波电路在电容 $C_3 \geq 1\ 000\ \mu\text{F}$ 时可满足负载电流 $0.15 \sim 1.5\ \text{A}$ 、输出电压 $50 \sim 500\ \text{V}$ 可调,可满足EIS/EIM脉冲电源加速老化寿命实验的需要。

4 结束语

利用脉冲变压器隔离的桥式逆变电路和Buck型PWM调压电路构成了高隔离可调直流电源主电路,利用线性VFC将高隔离输出直流电源变换为脉冲信号,由光纤进行隔离传输,再由嵌入式微处理器利用隔离传输的VFC脉冲可以实现输出电压的高隔离度检测,从而实现输出电压的调压和稳

压闭环控制。经近1年的运行实验测试,该电路运行稳定可靠、隔离电压高,可满足电工绝缘材料与电气绝缘系统电性能实验和加速电老化寿命实验用级联式高压脉冲电源的需要。

参考文献:

- [1] 叶强, 吴广宁, 张雪原, 等. 高压脉冲方波下聚酰亚胺薄膜电老化寿命模型[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 25-30.
- [2] 蒋存波, 曾莎, 闫军部, 等. 一种绝缘寿命测试用高压方波脉冲电源的研制[J]. 电测与仪表, 2012, 49(9): 91-96.
- [3] 佟来生, 吴广宁, 刘曦, 等. 基于连续高压脉冲方波的绝缘老化寿命模型[J]. 电工技术学报, 2006, 21(8): 44-47.
- [4] Wheeler J C G. Effects of converter pulses on the electrical insulation in low and medium voltage motors [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(2): 22-29.
- [5] 李宏, 赵家贝. 浅析高频开关电源的发展[J]. 电气应用, 2011, 30(4): 50-54.
- [6] 陈天乐. 开关电源的新技术与发展前景[J]. 通信电源技术, 2014, 31(2): 101-102.
- [7] 孙鹏菊. 输出宽范围连续可调的变结构恒功率电源的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [8] 刘雪, 赵柏树, 杨维明. 单片机控制的精密可调开关电源设计[J]. 电源技术, 2014, 38(3): 535-537.
- [9] 胡逢峰, 王正仕, 陈辉明, 等. 一种输出电压可调的大功率开关电源[J]. 机电工程, 2011, 28(9): 1153-1156.
- [10] 杨祥, 魏华, 郭哲. 数字家庭嵌入式Web Server系统软硬件设计[J]. 桂林理工大学学报, 2010, 30(3): 445-448.
- [11] 金红, 蒋存波, 陈小琴. 一种MODBUS-PROFIBUS节点通信控制与协议转换模块设计[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(8): 1922-1925.

Power supply design of highly insulated DC based on STM32F103 embedded system

JIANG Cun-bo, XU He-fei

(College of Information Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Electrical insulation systems and aging acceleration test of electrical insulation pulse stress need adjustable DC supply of high cascading isolation degree. Triple insulated wire winding DC/DC booster isolation transformers are selected. High isolation can be realized by adding two layers of polyimide NOMAX insulating paper between the former side edges. The output voltage regulation and control are realized by embedded circuit control for DC/DC and Buck inverter bridge regulating control. Various coupling modules constitute master-slave field bus network as slave node through RS485 interface and ModBus protocol, under the management of the embedded module coordination. It is shown that the power supply can meet the requirement of pulse electrical insulation stress acceleration aging test.

Key words: embedded systems; isolated switching power supply; fieldbus