

文章编号: 1001-1609(2007)04-0301-03

# 便携式智能直流高压发生器的研制

周录波, 江秀臣, 李立学

(上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

Design of a Portable Intelligent DC High Voltage Generator

ZHOU Lu-bo, JIANG Xiu-chen, LI Li-xue

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

摘要: 介绍了一台便携式智能直流高压发生器, 其功率部分采用开关电源技术和倍压整流技术, 控制部分采用单片机(MCU)和 CPLD 结合的结构, 测量部分采用 AD 采样单片机处理的方法。整个装置实现了便携化、数字化和智能化。目前, 该装置运行可靠。

关键词: 直流高压发生器; 倍压整流; 单片机; CPLD

中图分类号: TM83

文献标志码: A

Abstract: A portable intelligent DC high voltage generator was introduced. The generator was based on the technology of switching power supply and voltage multiplier circuit. It was controlled by the combination of MCU and CPLD. The measurement was completed by the sampling of ADC and the working of MCU. The generator is a portable, digital and intelligent device, and has been proved reliable.

Key words: high voltage generator;

voltage multiplier circuit; MCU; CPLD

## 0 引言

直流高压发生器是高压试验仪器中主要测试设备之一, 在高压试验中应用广泛, 如避雷器、电力电缆、电力电容器、电动机定子绕组的直流耐压试验等。结合现场电力试验的要求, 开发了以 MCU+CPLD 架构为控制核心的数字化便携式直流高压发生器, 其基于开关电源技术, 具有 40 kHz 高频整流逆变和 8 级倍压整流。该装置额定功率为 1 000 W, 输出电压 0~200 kV 连续可调, 额定最大输出电流 5 mA, 具有可靠的过压过流保护功能和良好的人机界面, 另外还可以完整记录试验数据并将其传送至计算机。笔者将对整个系统的工作原理以及几个关键部分的设计进行介绍。

## 1 系统方案和工作原理

系统原理框图见图 1。为方便现场试验, 该系统采用单相 220 V 交流输入。交流输入首先经过 EMI 滤波电路, 然后进入 PFC 模块。EMI 滤波网络可防止高频电路产生的大量高次谐波进入电网, 也可阻止电网的各种谐波进入整流电路, PFC 模块用以提高装置的功率因数。经过 PFC 环节后是工频整流, 交流 220 V 经过整流后得到约 300 V 的直流电压。半桥变换器工作在 40 kHz, 它将整流得到的 300 V 直流变换成为 0~150 V 连续可调的稳定的直流电压; 全桥变换器再将此稳定的直流电压逆变成 40 kHz 的交变方波电压; 方波电压经过变比为 1 100 的高频升压变压器进行初步升压, 即可得到最大值约为 15 kV 的交变方波电压。初步升压后的交变方波电压经过 8 级倍压电路继续升压, 最终得到幅值为 200 kV 的直流负高压<sup>[1]</sup>。

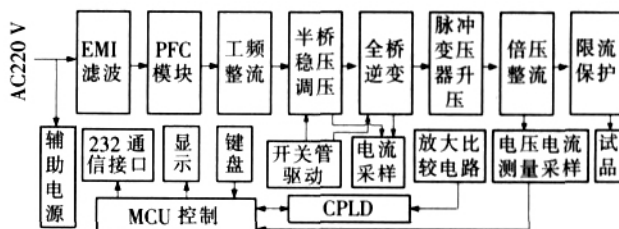


图 1 系统原理框图

整个系统采用 MCU 和 CPLD 结合的控制方式, 配有良好的人机交互功能, 设置了完善的过压过流保护。为了便于现场试验记录数据, 设置了 RS232 通信接口, 测试中由系统记录的数据可以通过该接口上传至计算机。

## 2 控制部分设计

控制部分硬件电路主要由单片机和 CPLD 两部

收稿日期: 2007-01-25; 修回日期: 2007-03-07

作者简介: 周录波(1980-), 男, 江苏连云港人, 在读硕士研究生, 从事高电压试验技术的研究。

分组成。单片机采用 Cygnal C8051F020, 其与 MCS-51 指令集完全兼容, 内部自带 64 kB 的 FLASH 存储器, 4352 字节 RAM, 并且具有 12 位 AD 和 2 个电压比较器<sup>[2]</sup>。这些设置简化了单片机的硬件电路设计, 不需要另添外设就可以满足系统的要求。

CPLD 采用 EPM7032AE, 该器件有 600 个门, 32 个宏单元, 2 个逻辑阵列块, 36 个供用户配置的引脚。和 C8051F020 一样, 所需电源电压为 3.3 V。

单片机 C8051F020 负责半桥调压部分和全桥逆变部分 PWM 的调节、保护信号的处理、试验结果的记录以及人机交互等功能。单片机发出 PWM 信号后首先送入 CPLD, 在 CPLD 中实现上下桥臂 PWM 的互锁, 并与保护信号相与后再输出送往开关管驱动电路, 保证不会因为 PWM 的相位错误出现上下桥臂开关管的共态导通。保护信号有效后首先送往 CPLD 将 PWM 信号屏蔽, 保证以最快的速度关断 PWM。半桥调压部分和全桥逆变部分的 PWM 信号都是 40 kHz, 全桥逆变部分 PWM 占空比固定在 85%, 通过调节半桥部分 PWM 占空比达到调节输出电压的目的。

软件采用增量式 PID 算法, 在系统升压阶段给定输入值, 按照设定的升压速度增加, 当达到给定值后, 进入稳压阶段。反馈信号从最终输出采样得到。

单片机和 CPLD 的协同工作减轻了主单片机的工作负担, 提高了保护信号处理的速度, 同时也便于以后系统控制功能的扩展。

### 3 驱动电路设计

该设计中, 开关管采用场效应管 IRFP460, 驱动电路采用 A316J 芯片, 它自身带有光耦隔离, 瞬时驱动电流可以达到 2 A, 同时具有  $V_{ce}$  电压欠饱和检测电路及故障状态反馈电路; 芯片能兼容 CMOS 和 TTL 电平, 最大开关速度可达 500 ns, 其工作电压范围也很宽, 可在 15 ~ 30 V 的直流供电下工作<sup>[3]</sup>。A316J 可以很方便地完成和 MCU 的接口。驱动电路原理图见图 2。

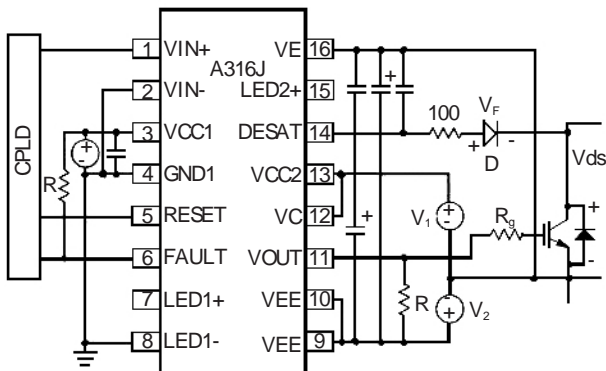


图 2 A316J 驱动原理图

如图 2 所示, PWM 信号由 CPLD 引入 A316J 的

1 脚 VIN+, 2 脚 VIN- 接低电平, 此时 A316J 工作在同相输出方式。A316J 的 RESET 信号也由 CPLD 引入, 必要时, 在 MCU 的判断下, CPLD 发出 RESET 信号, 复位 A316J。当 A316J 检测到 MOSFET 过流后, A316J 自身关断 PWM 输出, 同时 FAULT 信号有效, CPLD 检测到 FAULT 信号后也关断 PWM 输出, 并将此信号送往主单片机, 由主单片机进行错误处理。

为防止工作中因干扰发生场效应管的误导通, 在驱动电路中设计了负压关断的功能。A316J 的 13 脚 VCC2 由 15 V 直流电源  $V_1$  供电, 10 脚 VEE 由 5 V 直流电源  $V_2$  供电, 极性见图 2。

调试结果显示, 采用 A316J 可以达到良好的驱动效果, 驱动开关管的 PWM 上升沿时间可以小至 200 ns 而不引起振荡, 下降沿时间也约为 200 ns。图 3 为系统满载时其中一个桥臂的驱动波形。

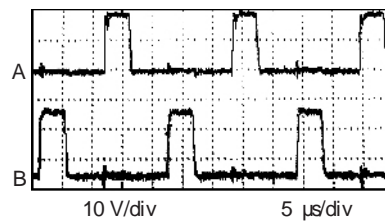


图 3 开关管驱动波形

### 4 倍压整流部分设计

由于存在分布参数等原因, 高频变压器的变比不可能做的很高, 因此, 该设计由变压器和倍压整流电路配合完成升压。倍压整流电路见图 4。

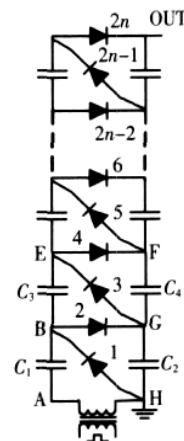


图 4 倍压整流电路

图 4 为  $n$  个倍压电路串联连接原理图, 图中 ABGH 部分是其中一级倍压整流电路。当整流器 1 导通时,  $C_1$  充电到  $+U_m$  B 点对地电位在  $0 \sim +2U_m$  间振荡。  $C_2$  通过整流器 2 充电到  $+2U_m$  G 点获得稳定电位  $+2U_m$  电压通过整流器 3 加到  $C_3$  上, 并在  $+U_m \sim 0$  之间变化, 因而  $C_3$  被充电至  $+2U_m$  E 点电位在  $+2U_m \sim +4U_m$  变化, 电容器  $C_4$  通过整流器 4 充电至  $+4U_m$  因此 F 点获得稳定的  $+4U_m$  的电位。以此类推, 3 级串连

可得到 $+6U_m$ 的输出电压,4级串连可得到 $+8U_m$ 的输出电压, $n$ 级串连可得到 $2nU_m$ 的输出电压<sup>[4]</sup>。

考虑到留取一定的裕量,该设计采用8级倍压,可得到 $16U_m$ 的输出电压。如前所述,在1:100升压变压器的输出侧得到的是 $U_m$ 为15 kV的40 kHz的交流方波电压,因此,可以可得到 $16 \times 15\ 000\ V = 240\ kV$ 的直流高压。

## 5 高压测量部分

直流耐压试验一般是和泄漏电流试验同时进行的,因此输出电压和泄漏电流需要同时测量。

直流电压的测量见图5, $R_1$ 和 $R_2$ 组成分压器,直流负高压经电阻分压后得到数值较小的取样电压,经过缓冲放大环节后进行AD采样,再由单片机处理后送往主板上的主单片机存档并显示。

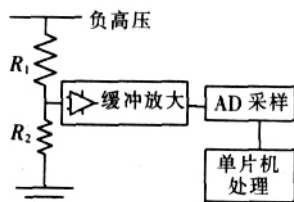


图5 高压测量原理图

直流高压试验中泄漏电流一般不超过几十毫安,对测量精度要求比较高。图6为一般直流高压试验泄漏电流试验接线图。

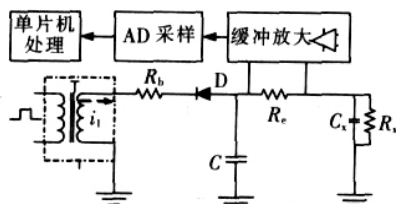


图6 泄漏电流测量原理图

图6中T是升压变压器, $R_0$ 是限流电阻,D和C分别是等效高压硅堆和滤波电容, $R_x$ 和 $C_x$ 是试品模

型<sup>[4]</sup>。由于升压变压器高压绕组侧电压高达15 kV,频率为40 kHz,此处对外壳的泄漏电流 $i_1$ 不可忽略,为了避免其影响测量精度,该设计中泄漏电流在 $R_0$ 处采样, $R_0$ 是采样电阻,串连在试验回路中,取样得到的电压信号经缓冲放大后进行AD采样,经过单片机处理后,测量数据再传输到直流高压发生器主单片机中存档并显示,这样试验人员不必像传统试验那样,需在近距离观察微安表读数,这样不但使测量更方便,也使高压试验更安全。

## 6 调试结果

该装置调试时进行了模拟负载试验,模拟负载采用耐压60 kV的5根功率为200 W的金属膜玻璃釉电阻串连,总阻值为40 M,将电阻用支柱式绝缘子支撑,将电压缓慢升高到200 kV,运行过程中模拟负载电阻用风扇散热,连续运行30 min,装置各部分工作良好。调试中设置了合适的过流过压保护阈值,保护功能灵敏可靠。将输出电压加到225 kV后,连续运行5 min,无闪络和击穿现象。最终测试表明,该装置各项指标均优于中华人民共和国行业标准ZBF 2400390《便携式直流高压发生器通用技术条件》中规定的技术指标,达到了设计要求。

## 参考文献:

- [1] 徐青龙. 便携直流高压发生器的研制[J]. 电工技术, 2005(10): 48-50.
- [2] 潘琢金. C8051F02x 单片机数据手册[Z]. 沈阳: 新华龙电子有限公司, 2005.
- [3] Agilent technologies. 2.0 Amp Gate Drive Optocoupler with Integrated (VCE) Desaturation Detection and Fault Status Feedback (A316J datasheet) [EB/OL]. 2005, www.agilent.com/semiconductors.
- [4] 胡国根, 王战铎. 高电压试验技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1996.

(上接第300页) 群体比幅比相法、零序电流有功分量法、零序电流增量法有机地结合在一起,构成复合型微机小电流接地选线装置;在系统单相接地发生后,由上述方法得出的初步的选线结果,再采用模糊控制、综合比较判断的方法,得出最终的选线结果,大幅度地提高了选线的准确率。采用复合式选线,不仅使装置适用于中性点不接地系统,而且适用于中性点经消弧线圈接地系统,灵活性和适用性很强,成本也低。模拟试验和挂网运行的情况表明,装置选线的准确率达到100%。

## 参考文献:

- [1] 齐 郑, 杨以涵. 中性点非有效接地系统单相接地选线技术

- 分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 1-5.
- [2] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [3] 牟龙华. 零序电流有功分量方向接地选线保护原理[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 60-62.
- [4] 蔡 旭, 李仕平, 杜永忠, 等. 变阻尼调匝式消弧线圈及接地选线装置[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 85-90.
- [5] 陈忠仁, 吴维宁, 陈家宏, 等. 补偿电网阻尼率及脱谐度问题研究[J]. 继电器, 2005, 33(4): 36-39.
- [6] 李 华. MCS-51系列单片机实用接口技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1996.
- [7] 叶 雷. 模糊数学在配电网故障选线中的应用[J]. 大众科技, 2005(2): 46-47.
- [8] 刘树杰, 陈 辉, 许 文. 模糊控制在配电网单相接地故障选线中的研究[J]. 山东冶金, 2005, 27(3): 44-45.