

一种用于 X 射线测厚仪的高压直流电源

赵卫东, 黄 锐, 冯德仁

(安徽工业大学 电气信息学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘 要:研制了一种用于 X 射线测厚仪的高压直流电源。电源主要由两部分构成, 第一部分为高频 AC/DC 变换单元, 设计实现过流、过压保护和输出电压调节的功能; 第二部分为高频 DC/DC 变换单元, 主要由全桥串联谐振变换器组成, 控制其输出准正弦波电压, 经高频升压变压器馈入到倍压整流电路得到直流高压, 采用谐振变换器可以实现软开关控制, 同时准正弦波相比于方波其含有的谐波成分少, 可以改善由于电路分布参数引起的谐振过电压造成的高压打火问题。两部分都引入高频变换, 可以减小装置体积并降低输出直流电压的纹波系数, 最后给出了设计实例以及相应的测试结果。

关键词:无损检测; 高压直流电源; 谐振变换器; 软开关; 倍压整流

中图分类号: TM531

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2011)03-0086-05

A Kind of High-voltage DC Power Supply for X-ray Thickness Gauge

ZHAO Weidong, HUANG Rui, FENG Deren

(School of Electrical Engineering and Information, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243002, China)

Abstract: A kind of high-voltage DC power supply was developed for the X-ray thickness gauge. The power supply consists of two units; the first one is AC/DC high-frequency transform unit designed for the protection of over-current, over-voltage and the voltage controlling, and the second one is DC/DC high-frequency transformation unit in which a full-bridge resonant converter is used to obtain the control of soft switch. In addition, the quasi-sine-wave voltage with high-frequency transformation is exported to rectifying circuit to improve the situation of high-voltage striking. High-frequency converter technology was adopted in both parts of the power supply, reducing the ripples of output DC voltage and cubage of the system. Finally, the design example of the power supply and test results were given.

Key words: nondestructive examination; high-voltage DC power supply; resonant converter; soft switch; voltage multiplier rectifier

高压直流电源广泛应用于生产和科研中, 主要包括了 X 光机高压电源、无损探伤高压电源、电子束焊接、粒子加速器、工业除尘中的尘埃吸附电源等^[1]。对于电压要求高、电流要求较小的高压直流电源, 通常采用对直流电进行高频逆变成交流方波电压, 然后通过高频变压器升压后馈入到倍压整流电路获得直流高压。采用这种技术, 试制了一台 80 kV 的 X 射线机用高压直流电源, 在调试过程中经常出现打火现象以至于击穿倍压整流器件, 输出电压的稳定性较差, 经过结构和工艺改进后仍出现这种现象, 后来分析认为是交流方波脉冲含有丰富的高次谐波成分, 这些高次谐波可能与次级的倍压电路构成谐振, 激起很高的谐振电压, 从而产生打火以至于损坏电容、高压硅堆等倍压器件^[2-3]。

为了消除打火问题和实现“软开关”控制, 引进串联谐振逆变电路, 使逆变器输出的不再是交流方波电压, 而是频率比较单一的准正弦波电压, 其谐波成分降低, 改善了电路中谐振引起的高压打火现象。同时, 谐

收稿日期: 2011-01-04

作者简介: 赵卫东(1972—), 男, 安徽界首人, 讲师, 主要从事电力电子功率变换方面的研究. E-mail: zwd720819@163.com.

振逆变电路可以工作在软开关状态,具有开关损耗少、效率高等优点,已经在工程应用中得到广泛关注^[4-7]。

鉴于以上分析,在高压直流电源的研制过程中引入了谐振变换技术,电源的电压最高可以达到 120 kV,并且在调试过程中很少有高压打火击穿器件的现象发生,在一定程度上提高了电源的可靠性。

1 基本串联谐振电路

基本串联谐振电路如图 1 所示,由谐振电感 L_r 、谐振电容 C_r 和电源 U_s 组成。设 t_0 时刻谐振电感的初始电流为 $i_{L_r}(t_0) = I_{L_r,0}$,谐振电容初始电压为 $u_{C_r}(t_0) = U_{C_r,0}$,不计电路损耗,从 t_0 时刻开始,谐振电感和谐振电容自由谐振工作,由图 1 可得

$$L_r \frac{di_{L_r}}{dt} + u_{C_r} = U_s, C_r \frac{du_{C_r}}{dt} = i_{L_r} \quad (1)$$

解方程(1)得电感电流和电容电压随时间变化的函数

$$i_{L_r}(t) = I_{L_r,0} \cos \omega_r(t-t_0) + \frac{U_s - U_{C_r,0}}{Z_r} \sin \omega_r(t-t_0) \quad (2)$$

$$u_{C_r}(t) = U_s - (U_s - U_{C_r,0}) \cos \omega_r(t-t_0) + Z_r I_{L_r,0} \sin \omega_r(t-t_0) \quad (3)$$

其中: ω_r 为谐振角频率, $\omega_r = 1/\sqrt{L_r C_r}$ 。 z_r 为特征阻抗, $z_r = \sqrt{L_r/C_r}$ 。

可以看出,谐振电感电流 i_{L_r} 和谐振电容电压 u_{C_r} 均为正弦波,谐振频率 f_r 决定于谐振电感 L_r 和谐振电容 C_r 的大小。当 $i_{L_r}(t_0) = 0, u_{C_r}(t_0) = 0$ 时得到:

$$i_{L_r}(t) = \frac{U_s}{Z_r} \sin \omega_r(t-t_0) \quad (4)$$

$$u_{C_r}(t) = U_s [1 - \cos \omega_r(t-t_0)] \quad (5)$$

式(4)和式(5)表明, $i_{L_r}(t)$ 和 $u_{C_r}(t)$ 分别按正弦和余弦规律变化,谐振电感和谐振电容所储的能量相互交换,一个达到最大值时,另一个为零。

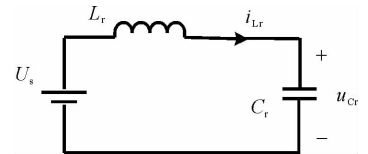


图 1 串联谐振电路原理图

Fig. 1 Sketch of the series-resonant circuit

2 电源系统设计

电源结构如图 2 所示可分为两部分,第一部分实现高频 AC/DC 变换,第二部分实现高频 DC/DC 变换。

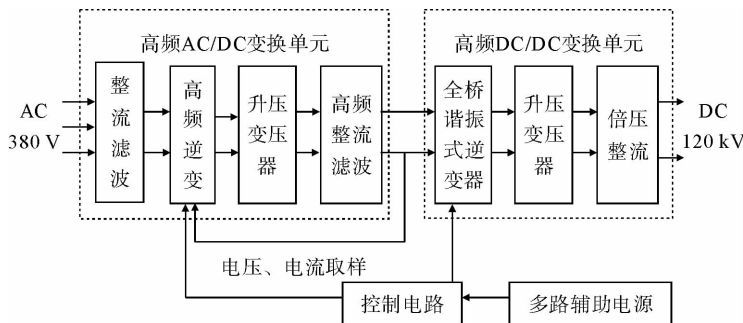


图 2 电源系统结构图

Fig. 2 The structural diagram of power supply system

2.1 高频 AC/DC 变换单元

三相市电整流滤波后馈入高频逆变器,逆变器把直流电逆变成方波交流电,然后馈入升压变压器,变压器变比为 1 : 1.5,主要起到隔离作用,目的是减少来自后级“谐振变换部分”的高频干扰。变压器的输出接到高频整流电路得到直流电压。

逆变电路采用传统的脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 方式, 主要以 SG3525 为核心构成控制电路, 输出频率在 15 kHz 左右, 系统在该部分构成闭环, 采样直流输出电压信号反馈到控制电路中, 通过与其相应的基准电压值比较, 来控制输出触发信号的占空比, 进而控制开关管的导通时间, 得到一个稳定的最高可达 500 V 的直流电压。

同时该部分还设置过流、过压保护, 对输出电流、电压进行采样, 反馈到控制系统, 一旦出现过流或过压, 控制电路停止输出触发脉冲, 关断逆变电路的开关, 使输出为零并报警。

对该部分电路进行测试, 测试负载取 80 Ω, 取样电阻 1.6 Ω, 输出直流电压 500 V 时, 测试结果如图 4 所示, 图中波形 1 为取样后直流波形, 波形 2 为纹波成份, 约为 1%。倍压整流输出电压纹波系数计算公式^[7]为

$$\delta = \frac{(n+1)}{4fCR} \times 100\% \quad (6)$$

其中: δ 为输出电压纹波系数; f 为交流电压频率; C 为电容电量; R 为负载阻抗; n 为倍压级数, 按 1 倍压粗略估计, 与实际测得基本符合。从式 (6) 可以得出, 提高倍压整流电路输入交流电的频率是降低直流电压纹波系数的有效途径。

2.2 高频 DC/DC 变换单元

电源的第二部分主要由串联谐振变换器、高频高压脉冲变压器和倍压整流电路构成, 电路的拓扑结构如图 5 所示, 图中 V_1 是前一单元的输出直流电压。通过设定谐振变换器的谐振频率和开关频率, 逆变得到准正弦波电压, 由高频高压脉冲变压器升压后接入倍压整流电路, 最终获得直流高压。

由前述分析可知, 串联谐振变换器输出电压的谐波成分少, 减少了由于谐振引起的高压打火和击穿现象。同时, 开关工作在“软开关”的状态, 开关损耗小、效率高。此外, 串联谐振电路有一个固有的特性阻抗, 因此其抗短路的性能非常好, 这个性能对于高压系统是非常重要的, 目前高压开关电源普遍采用谐振变换方式。依据逆变器开关频率 f_s 与谐振频率 f_r 的关系, 变换器有 3 种工作方式: ① $f_s < \frac{f_r}{2}$, 电流不连续工作模式 (DCM); ② $\frac{f_r}{2} < f_s < f_r$, 电流连续工作模式 (CCM); ③ $f_s > f_r$, 电流连续工作模式 (CCM)。本设计通过调整控制电路的触发脉冲频率, 使得电路工作在 $\frac{f_r}{2} < f_s < f_r$ 模式下。

谐振变换器各种工作模式下的谐振回路电流与电压的方程, 相关文献已经作了详尽的分析, 这里不再赘述。

由文献[6]和文献[7]可知, 一次谐振负载电容上的电压增量为

$$\Delta V = 4V_0 C_0 / C_c \quad (7)$$

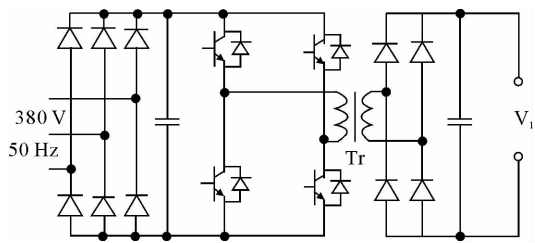


图 3 电源第一部分的原理图

Fig. 3 Schematic diagram of first unit of the power supply

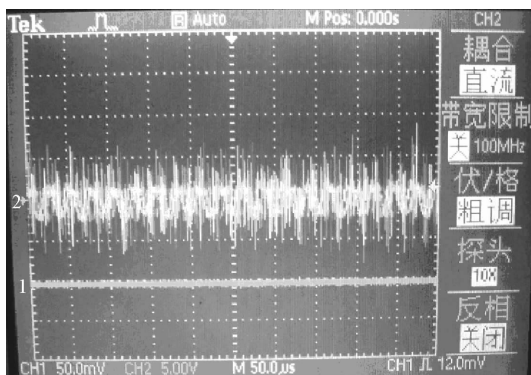


图 4 直流电压取样波形和纹波成分图

Fig. 4 The waveforms of DC-voltage sampling and ripple components

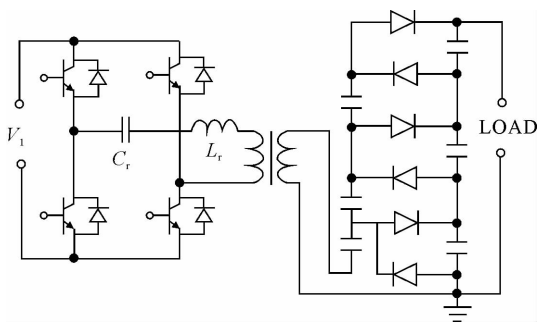


图 5 电源第二部分的原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the second unit of the power supply

进而求得谐振电容 C_r , 谐振电感 L_r 为

$$C_r = nC_e \Delta V f_s / (4V_0 f_r), \quad (8)$$

$$L_r = V / n\pi^2 C_r \Delta V f_r f_s. \quad (9)$$

根据前述分析, 由式(8)得谐振电容 C_r 为 $0.35 \mu\text{F}$ 。由式(9)计算谐振电感值 L_r 为 $60 \mu\text{H}$, 包括变压器次级折算到初级的漏感, 如果变压器漏感比较大, 可以省略谐振电感, 直接利用漏感作为谐振电感。高频变压器变比 n 为 $1:40$, 故谐振频率约为 35 kHz , 控制开关频率为 19 kHz 左右时, 谐振变换器工作在 CCM 模式。实验测得谐振电流与触发脉冲波形如图 6 所示。

高频变压器初级最高峰值电压接近 500 V , 变压器次级输出最高 20 kV , 倍压整流电路倍压电容采用 6 nF , 高压硅堆反向耐压值为 35 kV , 留有 15 kV 的余量, 经过 6 倍压整流后, 空载可获得最高 120 kV 直流电压^[8-9]。为了提高耐压绝缘强度和防止受潮, 将高频变压器和倍压整流电路整个升压部分放在一个装有变压器油的大油箱中, 油箱内同时还设置了取样电阻阵列, 供测量高压用, 通过端子与外部连接, 直流高压电通过高压插头与外部连接, 油箱实物如图 7(a) 所示。

2.3 控制电路和辅助电源

系统控制电路由两部分组成, 分别控制两个逆变器, 主要由 SG3525, LM358, EXB841 及外围电路组成。

SG3525 是一款功能齐全、通用性强的单片集成 PWM 芯片, 其主要功能包括基准电压产生电路、振荡器、误差放大器、PWM 比较器、欠压锁定电路、软启动控制电路、推挽式输出等。使用灵活方便, 适用于中小功率开关电源的驱动电路设计。使用该集成电路芯片构成的开关电源不但具有良好的性能, 而且还具有外围器件少, 调试和安装简单等优点。

LM358 内部包括有两个独立的、高增益、内部频率补偿的双运算放大器, 适合于电源电压范围很宽的单电源使用, 也适用于双电源工作模式, 在推荐的工作条件下, 电源电流与电压无关。

EXB841 是日本富士公司提供的 $300 \text{ A}/1200 \text{ V}$ 快速型 IGBT 驱动专用模块, 整个电路延迟时间不超过 $1 \mu\text{s}$, 最高工作频率达 $40\sim 50 \text{ kHz}$, 它只需外部提供一个 $+20 \text{ V}$ 单电源, 内部产生一个 -5 V 反偏压, 模块采用高速光耦隔离, 射极输出, 有短路保护和慢速关断功能。EXB841 模块内部包括光电耦合器、运算放大器、推挽电路、过流保护以及稳压管输出基准 5 V 电压等几部分。

辅助电源主要为控制系统和显示部分供电, 由一个多抽头变压器将工频交流 220 V 电作多种降压变换, 经整流滤波以及 7818、7815、7915、7805、7905 三端集成稳压器后直接对各部分供电。可以提供 $+18 \text{ V}$, $\pm 15 \text{ V}$, $\pm 5 \text{ V}$ 三种多路电源, 除去高频高压变压器和倍压整流电路外, 电路其余部分以及控制电路和辅助电源都放置在一个箱子内, 如图 7(b) 所示。

3 结论

在电源的设计中, 考虑到将闭环取自终端高压输出可靠性与安全性都不高, 尝试在低压侧实现闭环稳压, 并设过流、过压保护。同时, 由于 X 射线测厚仪负载需要高电压小电流, 故采用倍压整流器; 采用谐振逆

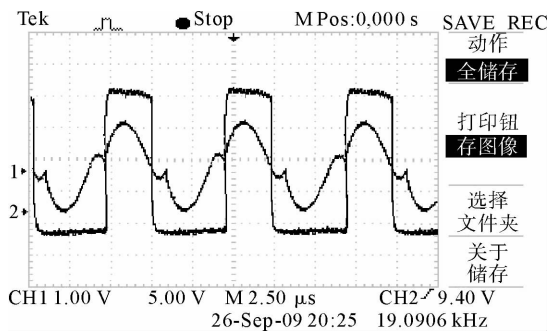


图 6 谐振电流和开关管驱动电压波形图

Fig. 6 The waveforms of resonant current and driving voltage of switches



(a) 变压器油箱



(b) 控制电路及辅助电源箱

图 7 电源装置实物图

Fig. 7 Appearance of the power supply

变电路,解决高压时频繁打火的问题;利用了CCM模式下串联谐振逆电路具有恒流充电、软开关等突出优点。由图6可以看出,当驱动信号上升沿到来时,正向谐振电流的值为零,实现了开关管的零电流开通。当驱动信号的下降沿到来时,谐振电流也已基本过零,从而实现了开关管的零电流关断。高压直流电源系统组装后,在实验室进行了相关数据的测试,为了模拟X射线发射装置,在高压直流电源系统的输出侧接25 M Ω 等效电阻负载,电源的容量在700 VA左右,用高压探头测得电源最高输出电压可达到120 kV,效率在80%左右,输出电压变化时,效率也变化。总的来说,电源的测试结果和理论分析基本相符合,但在提高电源输出功率方面,还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] LEE S Y. Accelerator physics base[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2006.
- [2] 冯德仁, 郭宏, 王相恭, 等. 方波馈电的高压倍压整流电路打火机理分析[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(2): 68-70.
FENG Deren, GUO Hong, WANG Xiangqi, et al. Analysis of striking mechanism of high voltage-doubling rectifier with square waves[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2008, 27(2): 68-70.
- [3] 邵建设, 尹建武, 冯杰, 等. 谐振变换器中电流-开关频率特性[J]. 高电压技术, 2009, 35(1): 163-167.
SHAO Jianshe, YIN Jianwu, FENG Jie, et al. Characteristic of resonant current vs switching frequency of series resonant converter[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(1): 163-167.
- [4] 王广州, 师宇杰, 唐丽焕, 等. 串并联谐振倍压变换器高压电源的设计与研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 98-101.
WANG Guangzhou, SHU Yujie, TANG Lihuan, et al. Design and research of a series-parallel resonant dual voltage circuit of high-voltage power supply[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7): 98-101.
- [5] 张春林, 严萍. 基于DSP的数字化高压直流电源的研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 224-2243.
ZHANG Chunlin, YAN Ping. Research of digital high voltage DC power supply based on DSP[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 224-2243.
- [6] 王广州, 师宇杰, 刘小宝, 等. 串并联谐振倍压变换器原理分析、建模及仿真[J]. 电力电子技术, 2006, 40(2): 116-118.
WANG Guangzhou, SHI Yujie, LIU Xiaobao, et al. Principle analysis modeling and simulation of a series-parallel resonant dual voltage DC/DC converter[J]. Power Electronics, 2006, 40(2): 116-118.
- [7] 苏建仓, 王利民, 丁永忠, 等. 串联谐振充电电源分析设计[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(12): 1611-1614.
SU Jiancang, WANG Limin, DING Yongzhong, et al. Analysis and design of series resonant charging power supply[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(12): 1611-1614.
- [8] 朱志杰, 张贵新, 刘亮, 等. 用于产生等离子体的高压脉冲电源的研制[J]. 高电压技术, 2007, 33(2): 28-31.
ZHU Zhijie, ZHANG Guixin, LIU Liang, et al. Development of a pulse generator for exciting plasma[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(2): 28-31.
- [9] 范鹏, 刘星辉. 10 kW 高压电源的研制[J]. 现代雷达, 2006, 28(12): 97-99.
FAN Peng, LIU Xinghui. Developing of 10 kW high voltage power supply[J]. Modern Radar, 2006, 28(12): 97-99.