

CO₂ 激光器大功率开关电源的研究

Study of Switching Power Supply for CO₂ Laser

华中理工大学 冯功和 周茂华 王冬青 (武汉 430074)

黄石赛恩思电子有限公司 黄益民 (武汉 435006)

20-22

TN86 TN248.22

摘要:介绍了半桥式 PWM 开关电源的工作原理及主电路,详述了用于原边电流保护的电流变压器设计及多种双重保护电路,并对实验结果进行了讨论。

Abstract: The paper introduces the basic principle and main circuit of PWM half-bridge switching power supply. The design of the current transformer for primary current protection and varied kinds of double protection circuits are studied in details. The experiment result is also discussed.

关键词: 电流保护 变压器 逆变器 激光器

Keywords: current protection; transformer; inverter; laser

1 前言

激光加工在钢铁、船舶、飞机制造及电子工业等领域有着广泛的应用,其市场前景广阔,美国、日本、西欧等国都在竞相发展。激光加工设备均采用开关电源技术,该技术的应用大大提高了激光加工机的性能,减小了体积,提高了效率,扩展了市场^[1]。针对此情况,我们开发了6kW CO₂ 激光器开关电源。

2 技术指标

6kW CO₂ 激光器开关电源的技术指标为:

输入电压: AC 50Hz(三相 380V)

输出电压: 2~4kV(连续可调)

输出功率: 6kW

输出方式: 逆变脉动直流输出($f = 10 \sim 20\text{kHz}$)

调制输出(调制 $f = 100 \sim 1000\text{Hz}$)

连续工作时间: $\geq 24\text{h}$

3 开关电源的工作原理

应用高频逆变技术可使激光器具有连续和调制的脉冲输出,既可提高效率,减小体积,又易于高功率输出。这种电源更适合呈非线性负阻特性,且常出现放电不稳定的 CO₂ 激光器,其电源原理框图见图 1^[2,3]。

交流 380V 经电源滤波、晶闸管整流滤波可得 0~500V 直流可调电压,供给脉宽调制变换器。变换器由分压电容 C₂ 和 C₃、IGBT 模块、高频变压器 T 及整流电路组成。控制电路

提供相位差为 180° 的脉冲,用以交替控制开关管的通断,将直流变为 20kHz 的脉冲电压,经升压变压器升至 4kV,再经全波整流电路变成 40kHz 的单向脉冲电压。若电网电压变动或负载变动,系统可通过相应的反馈,调整占比,以实现稳压,保持稳定输出。

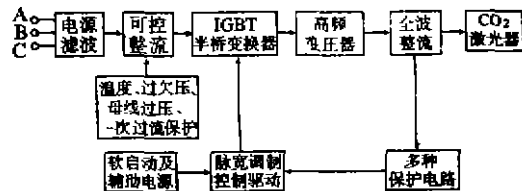


图 1 开关电源原理框图

4 主回路及保护电路

考虑到开关电源的输出功率为 6kW,且要求工作可靠稳定,输出电压连续可调,我们选用三相半波可控整流以实现电压的连续可调,选用抗不平衡能力强、变压器利用率高、电路简单的半桥变换器为主回路,其原理见图 2^[2,4]。

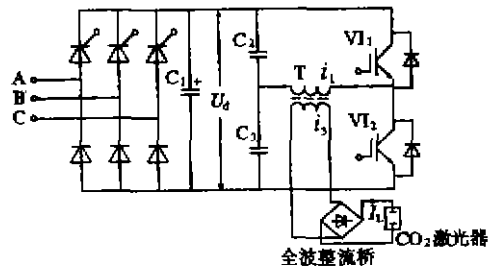


图 2 主回路原理图

4.1 保护电路结构

在变换器型开关电源中,除了采用软起动电路外,还设计了比较完善的保护系统,其特点是多种双重保护,结构见图3^[1]。

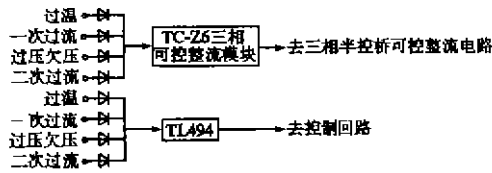


图3 保护电路结构

4.2 用于原边电流保护的电流互感器设计

根据激光器的实际工作要求,输出负载电流 I_{Lmax} 不能超过1.6A,因T的输出为桥式全波整流(见图2),当流过主回路T副边的电流有效值 $i_3 = 1.11 I_L = 1.776 A$ ^[4];流过主回路T原边的电流有效值 $i_1 = (N_2/N_1) i_3 = 35.52 A$ 时,控制回路和三相半控桥整流电路立即关闭,其中 I_L 为桥式全波整流输出电流平均值; N_1 、 N_2 分别为T的原、副边绕组匝数。按照国产MXD-2000, ϕ 为 $10 \times 6 \times 5$ 的环形磁心进行设计。

(1) 计算最大允许励磁的安匝数 ($A \cdot N$)

图4示出保护电路的电流取样原理。电流互感器应工作在磁滞回线的线性区段,选用的环形磁心饱和磁通密度 B 约为 $0.3 Wb/m^2$ 。考虑到温度影响,最大工作磁通密度 B_m 选用 $0.18 Wb/m^2$ 。此时相应的磁场强度 H_m 可按下式计算^[5]。取所使用磁性材料的导磁率 $\mu_r = 1500$, 则:

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_0 \mu_r} = 95.5 A \cdot N/m \quad (1)$$

式中 μ_0 ——真空的导磁率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$

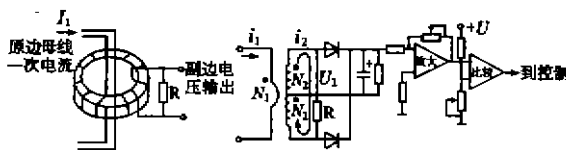


图4 电流互感器检测原理图

当环形磁心为 $10 \times 6 \times 5$ 的磁路平均长度 $L_c = 25 \times 10^{-3} m$; 截面积 $S_c = 0.1 \times 10^{-4} m^2$ 时,对应的励磁安匝数为 $N_1 I_{\mu m} = H_m L_c \approx$

$2.4 A \cdot N$, 其中 $I_{\mu m}$ 为电流检测变压器的最大励磁电流分量。

(2) 计算副边绕组的去磁安匝数

在开关电源的负载电流达到1.6A(折算到原边为35.52A)时,电流互感器原边的总安匝数除了 $2.4 A \cdot N$ 用做励磁外,其余应被副边绕组的去磁安匝数抵消,并有以下关系^[4]:

$$I_2' = \frac{2N_2 I_2}{N_1} = \sqrt{I_1^2 - I_{\mu m}^2} \quad (2)$$

式中 I_2' ——副边折算到原边的电流

I_{μ} ——流过原边的励磁电流中的无功分量

因 $N_1 = 1 T$, 所以 $N_1 I_2' = 35.44$ 。

(3) 计算 N_2 与电阻 R 的比值 (N_2/R)

对应1.6A负载电流时的副边去磁安匝数已求出,如果确定电流检测比较电路中的 U_{max} 为 U_2 , 则可确定

$$\frac{N_2}{R} = \frac{N_1 I_2'}{4U_2} = 2.9533 \quad (3)$$

式中 U_2 ——电流检测变压器所检测到的电压, $U_2 = 3V$

(4) 计算 N_2

将 $f = 20 kHz$ 和 S_c 、 L_c 、 N_1 、 I_1 、 U_2 、 N_2/R 、 μ_0 及 μ_r 代入下式,可求得

$$N_2 = \frac{1}{4f S_c \mu_0 \mu_r} \cdot \frac{1}{L_c} \sqrt{\frac{N_1^2 I_1^2}{U_2^2} - 4^2 \left(\frac{N_2}{R}\right)^2} \approx 20 \quad (4)$$

(5) 计算 R

$$R = \frac{N_2}{N_2/R} \approx 6.8 \Omega \quad (5)$$

取 $R = 7 \Omega$ 。

(6) 计算实际的 U_2 和 B 值

将上述已知参数代入下式,可得实际的

$$U_2 = \frac{(4f S_c \mu_0 \mu_r \frac{1}{L_c} N_2 N_1 I_1)}{\sqrt{1 + 4^4 f^2 S_c^2 \mu_0^2 \mu_r^2 N_2^4 \frac{1}{L_c^2 R^2}}} \approx 0.00873 I_1 \quad (6)$$

由此可得 I_L 、 I_1 及 U_2 的关系如下表。

$I_L (A)$	0.20	0.50	0.80	1.00	1.20	1.60
$I_1 (A)$	4.44	11.10	17.76	22.20	26.64	35.52
$U_2 (V)$	0.40	1.00	1.60	1.94	2.33	3.10

在 $I_1 = 35.52\text{A}$ 时, 计算得到的 U_2 与设计值相符, 此时 $I_{\mu m} = \sqrt{I_{1m}^2 - I_{2m}^2} = 2.5\text{A}$, $H_m = \frac{I_{\mu m} N_1}{L_c} = 100\text{A} \cdot \text{N}/\text{m}$, $B_m = \mu_0 \mu_r H_m = 0.1885\text{Wb}/\text{m}^2$, 上述计算表明, N_2 和 R 的数值合适。

(7) 计算 R 的功耗

R 的最大功耗:

$$P_{R\max} = \frac{(2U_2)^2}{R} \approx 5.5\text{W} \quad (7)$$

选取适当的 R 串并联, 即可满足要求。

5 保护电路的调试及输出波形

根据上述设计参数和提出的电路进行阻性负载试验, 经调整, 得到如下测试结果。

(1) 过流保护

调整比较电平, 检测表明, 当 I_L 分别为 1A 、 1.2A 、 1.6A 时, 过流保护立即关闭低压回路和高压回路。

(2) 过压保护

当调压器电压使输入电压 U_1 由 380V 上升至 422V 时, 过压保护开始, 保护百分比为 11% 。

(3) 欠压保护

当调压器电压使 U_1 由 380V 下降至 362V 时, 欠压保护开始, 保护百分比为 5% 。

(4) 过热保护

由于 IGBT 模块用了较大的散热器, 温升不明显, 我们的保护重点是高频变压器。采用的检测元件是温升开关。

(5) 限幅保护

当晶闸管主电路电压大于或等于 400V 时, 进行限幅保护。

作者简介

冯功和: 男, 1939年7月生, 副教授。从事激光及其应用的研究。

周茂华: 男, 1964年10月生, 硕士, 讲师。从事激光及计算机自动控制的研究。

王冬青: 女, 1972年9月生, 硕士生。从事激光及电子技术的研究。

黄益民: 男, 1969年3月生, 工程师。从事真空设备及弧焊电源的研究。

调试分阶段进行, 并且确认保护系统稳定可靠后, 经测试得到图5波形, 其 V_{I_2} 的集电极电压 U_{c2} 和发射极电流 I_{e2} 与图5类似。

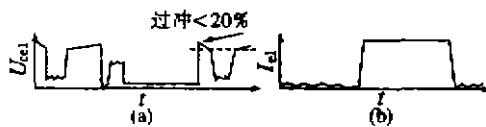


图5 测试波形

(a) 集-射极电压 (b) 发射极电流

由此可见, 改进变压器绕组的绕制方法, 可抑制分布参数对波形的影响, 得到良好的开关波形。经在 300W CO_2 扩散冷却约束放电激励激光器中长期运行发现, 放电稳定, 工作可靠。

6 结束语

大功率高压开关电源体积小、效率高, 可连续输出, 也可脉冲输出, 易于控制。研制的用于激光器的 6kW 半桥开关电源样机稳定可靠, 比高压直流激励有着无法比拟的优越性, 是激光电源发展的方向, 有着广阔的应用前景。

参考文献

- 1 波尔科夫 HB 等. 激光器电源. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- 2 叶慧贞等. 开关稳压电源. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- 3 李适民. 激光器原理与设计. 武汉: 华中理工大学出版社, 1994.
- 4 清华大学自动化系. 可控硅整流装置. 北京: 科学出版社, 1981.
- 5 徐德高等. 脉宽调制变换器型稳压电源. 北京: 科学出版社, 1983.

收稿日期: 1997-08-25

定稿日期: 1997-10-09