

文章编号: 1002-2082(2006)03-0225-03

半桥零电流准谐振 CO₂ 激光器开关 电源数学模型的构建

潘普丰, 侯蓝田, 田岩涛, 李欣欣

(燕山大学 红外光纤与传感研究所, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 分析了半桥零电流(ZCS)准谐振 CO₂ 激光器电源的工作原理和电路结构, 构建了其数学模型。采用编写的 MATLAB 程序对所建模型进行了仿真, 验证了该数学模型的合理性。该数学模型为半桥 ZCS 准谐振激光器电源的参数设计提供了依据, 具有一定的实用价值。

关键词: 零电流; 准谐振; CO₂ 激光器; 开关电源; 数学模型

中图分类号: TN248.2⁺2

文献标志码: A

Mathematical model for half-bridge ZCS quasi-resonant CO₂ laser switching power supply

PAN Pu-feng, HOU Lan-tian, TIAN Yan-tao, LI Xin-xin

(Institute of Infrared Optical Fibers and Sensors, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The operation principle and circuit structure of half-bridge zero-current quasi-resonant CO₂ laser switching power supply are presented and analyzed, and its mathematical model is established. The mathematical model was simulated with MATLAB program and verified by the experiment. It could be used as a reliable reference for system parameter design of the half-bridge zero-current quasi-resonant CO₂ laser switching power supply.

Key words: zero-current; quasi-resonant; CO₂ laser; switching power supply; mathematical model

引言

随着 CO₂ 激光器在雕刻技术和医疗技术中的发展, 以及在先进制造加工领域中的广泛应用, CO₂ 激光器电源的性能和指标对激光系统的性能起着决定性的作用, 因此对激光器电源提出了越来越高的要求。CO₂ 激光器的放电特性属于冷阴极辉光放电, 所以必须使 CO₂ 激光管的空载电压达到击穿电压(15~20 kV)。激光管作用电源的负载, 是呈负阻特性的非线性负载, 这就要求电源的输出特性与之相匹配。为了满足激光功率的连续可调, 激光器电源的电流、电压应有较宽的调节范围。激光雕刻系

统和激光医疗系统中 CO₂ 激光器电源产生的电磁干扰(EMI)将影响整个系统的可靠性, 特别是在激光医疗领域对激光器电源的要求更为严格。现有 CO₂ 激光器电源仍普遍采用可控硅调相整流方式, 一般在工频下工作。工频电感、工频变压器的使用使整机系统体积增大, 并引入了工频噪声, 劣化了使用环境, 这对 CO₂ 激光医疗系统的小型化提出了挑战。

近几年, 现代高频功率电子技术的迅速发展, 特别是新型功率电子器件的出现和软开关技术的日趋成熟, 为 CO₂ 激光器电源开辟了广阔的应用前

收稿日期: 2004-12-28; 修回日期: 2006-04-06

基金项目: 国家中小企业创新基金(01C26231300046)

作者简介: 潘普丰(1979—), 男, 湖南益阳人, 燕山大学信息工程学院硕士研究生, 主要从事激光器高频开关电源和信号处理研究工作。E-mail: panpufeng@88mail. ysu. edu. cn

景。本文采用半桥 ZCS 准谐振开关变换技术来实现电源的高频、低功耗、小电磁干扰、高压输出,非常适用于激光雕刻、激光医疗、激光加工等领域。我们建立了半桥零电流准谐振激光器电源的数字模型,并用 MATLAB 程序进行了仿真,验证了该数学模型的合理性,为 CO₂ 激光器电源的参数设计提供了可靠的依据。

1 半桥 ZCS 激光器准谐振开关电源工作原理

针对光纤激光雕刻系统中 CO₂ 激光器电源,采用二极管对 220 V 工频交流电进行全波整流。由于二极管的非线性作用,使输入电流成为一个时间很短、尖峰很高的周期性尖峰电流,从而使激光雕刻系统不能工作。所以,我们对该电源采用 2 级结构,前级由电压跟随器型 boot PFC^[1] 电路组成,可使输入电流很好地跟踪输入电压,并使输入功率因数几乎接近于 1;后级为半桥 ZCS 准谐振电路结构。脉冲调制和功率控制部分采用 TI 公司的 TMS-320407A 电路,并采用 4 倍压整流电路^[2]与激光器的负阻特性相匹配。激光器电源系统方框图如图 1 所示。后级半桥零电流准谐振电路结构如图

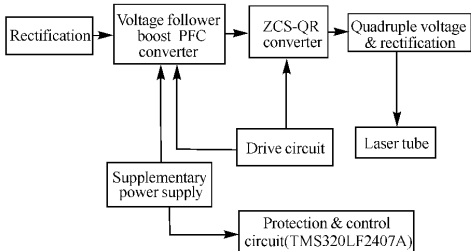


图 1 CO₂ 激光器开关电源方框图

Fig. 1 Block diagram of CO₂ laser switching power supply

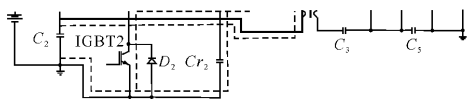


图 2 HB-ZCS 准谐振变换器主电路

Fig. 2 The main circuit of HB-ZCS quasi-resonant converter 2 所示。为了建立数学模型,我们假设所有元器件都为理想器件,电容 $C_1=C_2$ 且足够大,稳态时电容 C_1 和 C_2 均等分配输入电压,电容 $C_{r1}=C_{r2}=C_r$ 。当 IGBT1 导通,IGBT2 截止时,电路回路如图 2 中粗黑线所示, L_r 和 C_{r1} 构成谐振支路;当 IGBT1 截止,IGBT2 导通时,电路回路如图 2 中虚线表示, L_r 和 C_{r2} 构成谐振支路。

2 数学模型的建立

我们把图 2 电路等效成图 3 所示。其中 R_0 为变压器原副边线圈损耗的等效电阻和副边负载折合到原边的电阻之和。

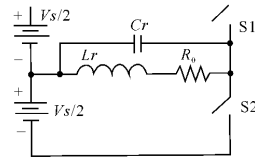


图 3 等效电路图

Fig. 3 Diagram of equivalent circuit

当 IGBT1 导通,IGBT2 截止时, T_x 原边的电流方向是从上到下;当 IGBT1 截止,IGBT2 导通时, T_x 原边电流方向是从下到上。所以,我们可以进一步把电路图等效成图 4 所示的数学模型图。该等效数学模型图中,有一个电压源 $V_i(t)$,其具体波形如图 5 所示。



图 4 等效数学模型图

Fig. 4 Diagram of equivalent mathematical model

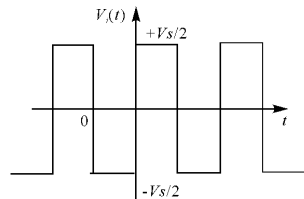


图 5 $V_i(t)$ 的波形图

Fig. 5 The waveform to $V_i(t)$

对 $V_i(t)$ 进行傅里叶级数展开,即

$$V_i(t) = \sum_{n=1, n \text{ 为奇数}}^{\infty} \frac{2V}{n\pi} \sin n\omega_s t$$

式中 $\omega_s = \frac{2\pi}{2T_s}$ 为开关角频率。

我们通过建立一个变换函数 $G(s)$ 来描述 $V_i(t)$ 与 $V_{Cr}(t)$ 之间的关系:

$$G(s) = L \left[\frac{V_{Cr}(t)}{V_i(t)} \right] = \frac{sL_r}{(s^2 R_0 L_r C_r + R_0 + sL_r)} \quad (1)$$

式中, L 为拉氏变换; $V_i(t)$ 可以写成:

$$V_i(t) = \sum_{n=1; n \text{ 为奇数}}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \left(\frac{e^{jn\omega_s t} - e^{-jn\omega_s t}}{2j} \right) \quad (2)$$

对于一个线性不变系统 $H(s)$, 它对复指数信号的响应也是同一复指数信号, 不同之处只是在幅度上有变化^[3], 即

$$e^{st} \longrightarrow H(s)e^{st}$$

于是, 有

$$i_{L_r}(t) = \frac{\int V_{C_r}(t) dt}{L_r} = \sum_{n=1; n \text{ 为奇数}}^{\infty} \frac{2V_s}{n^2 \pi \omega_s L_r} r e(-G(jn\omega_s) e^{jn\omega_s t}) \quad (4)$$

$$i_{C_r}(t) = \frac{C_r dV_{C_r}(t)}{dt} = \sum_{n=1; n \text{ 为奇数}}^{\infty} \frac{2\omega_s C_r V_s}{\pi} r e(G(jn\omega_s) e^{jn\omega_s t}) \quad (5)$$

因此, 一个开关周期的平均输入功率为

$$P_{in} = \frac{1}{2t_s} \left(\int_0^{t_s} \frac{V_s}{2} (i_{L_r}(t) + i_{C_r}(t)) + \int_{t_s}^{2t_s} -\frac{V_s}{2} (i_{L_r}(t) + i_{C_r}(t)) \right) = \sum_{n=1; n \text{ 为奇数}}^{\infty} \left[\frac{4V_s}{L_r n^3 \pi \omega_s^2} |G(jn\omega_s)| \sin(\theta(n)) - \frac{4V_s C_r}{n\pi} |G(jn\omega_s)| \sin(\theta(n)) \right] \quad (6)$$

式中 $\theta(n)$ 是 $G(jn\omega_s)$ 的相位角。

3 MATLAB 仿真分析

设 $V_s = 500$ V, 开关频率 $f_s = 100$ kHz, 谐振频率 $f_r = 200$ kHz, 我们根据上面的公式编写 MATLAB 程序, 得到了 $i_{L_r}(t)$ 和理想的 IGBT1 驱动波形, 如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 谐振电流波形

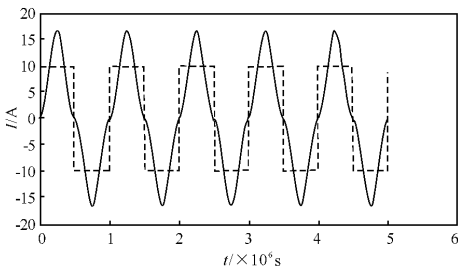


图 6 $i_{L_r}(t)$ 和理想的 IGBT1 驱动波形

Fig. 6 Resonance current waveform $i_{L_r}(t)$ and ideal IGBT1 driving waveform

$i_{L_r}(t)$ 不是标准的正弦波, 我们称为准正弦波, 称这种谐振为准谐振。 $i_{L_r}(t)$ 正向时 (IGBT1 导通, IGBT2 截止), 电流从电容 C_1 上极板经 IGBT1, L_r , C_{r1} 和变压器原边回到电容 C_1 下极板, 并从电容 C_1 吸收电能。当 i_{L_r} 从正向变为负向, 即 $i_{L_r}(t) = 0$ 时, IGBT1 截止, IGBT2 导通, 从而实现了 IGBT1 零电流关断, IGBT2 零电流开通。 $i_{L_r}(t)$ 负向时 (IGBT1 截止, IGBT2 导通), 电流从电容 C_2 上极板经变压器原边、 L_r , C_{r2} 和 IGBT2 回到电容 C_2 下极板, 从电容

$$V_{C_r}(t) = \sum_{n=1; n \text{ 为奇数}}^{\infty} \frac{2V_s}{2jn\pi} (G(jn\omega_s) e^{jn\omega_s t} - G(-jn\omega_s) e^{-jn\omega_s t}) = \sum_{n=1; n \text{ 为奇数}}^{\infty} \frac{2V_s}{2jn\pi} (G(jn\omega_s) e^{jn\omega_s t} - (G(jn\omega_s) e^{jn\omega_s t})^*) = \sum_{n=1; n \text{ 为奇数}}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \text{im}((G(jn\omega_s) e^{jn\omega_s t})) \quad (3)$$

C_2 吸收电能。当 $i_{L_r}(t)$ 从负向变为正向时, 即 $i_{L_r}(t) = 0$ 时, IGBT1 导通, IGBT2 截止, 从而实现 IGBT1 零电流开通, IGBT2 零电流关断。由于功率开关的电流、电压波形无重叠现象, 因此开关损耗理论上等于零, 不需要大的散热装置。这样, 可以大大提高开关频率, 减小元器件的尺寸, 从而减小了电源的体积^[4]。因此, 谐振电源不仅抑制了高次谐波, 电磁干扰 (EMI), 而且不需要另加缓冲吸收电路, 克服了 PWM 硬开关电路在高功率应用中不可避免的缺点。这也是 CO₂ 激光器电源的发展方向。

4 结论

本文从介绍半桥 ZCS 准谐振 CO₂ 激光器开关电源的工作原理与电路结构出发, 运用线性系统理论对该电路结构建立了数学模型, 并编写了 MATLAB 程序, 验证了该数学模型的合理性。

参考文献:

- [1] 严百平, 刘健, 程江丽. 不连续导电模式高功率因数开关电源 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 18-22.
- [2] TMS320LF/LC240XA DSP Controllers Reference Gu-ide-System and Peripherals [Z]. USA: Texas Instruments Incorporated, 2001.
- [3] 童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础 [M]. 第 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2001: 514-515.
- [4] 张明友. 信号与系统分析 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1991.
- [5] 导向科技. MATLAB6.0 程序设计与实例应用 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.