

无变压器大功率稳流连续固体激光电源

宁喜发 姚建铨

(天津大学精仪系)

Transformerless high power current-stabilized power supply for CW solid-state lasers

Ning Xifa, Yao Jianqian

(Department of Precision Instruments, Tianjin University, Tianjin)

提要: 该电源采用一种新型可控硅三相交流调压及其反馈控制的稳流方案; 输出电流 5~50 A 连续可调, 电流稳定度可达 0.5%, 输出电压 0~500 V 连续可调; 该电源具有运转稳定和容易调整等特点。

关键词: 电源, 激光, 稳流

一、引言

用三相 $L-C$ 变换器作恒流源给氩灯供电, 虽然电流稳定度也能保证, 但电源体积大, 重量相当可观。为大大减轻重量缩小体积, 我们研制成功了新型可控硅三相交流输出调压器, 它恰好可取代各种三相交流调压变压器, 应用于大功率激光电源中, 该电源便是其应用的一个实例。同时也克服了惯用的电流反馈串接大功率调整管阵列的稳流方式(该方式缺点较多)。

该电源框图如图 1 所示。分为手动和自动两档运转(见图 3)。其工作程序简述如下: 1. 选择运转方式 K_0 , 只有自动档才能稳流; 合 K_1 电锁, 这时 Z_1 亮, 水泵工作、触发、预燃及降压电路均接通 $220\sqrt{V}$ 。2. 按 K_2 触发氩灯, 预燃有效时 J_4 动作 J_2 随动, Z_2 亮表示可手动加压(用手动档)或在 W_1 复位情况下即可自

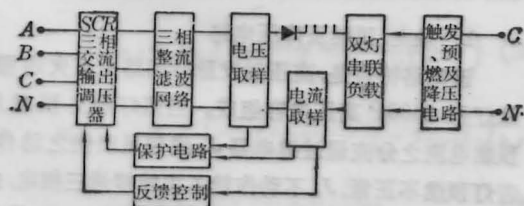


图 1

动加压(用自动档)。3. 按 K_3 钮启动工作, J_3 动作; 这时安培表应有指示, 粗调 W_1 、细调 W_2 , 使工作电流稳定在所需值上(用自动档); 或只调节 W (用手动档)。关机前使 W 退回至零(导通角 $\alpha=0$) 或使 W_1 、 W_2 复位, 最后关 K_1 。

二、电源-氩灯系统的电平衡方程 (稳流条件)

该电源的等效电路如图 2 所示。图中 V_s 为理想电压源, r_p 为电源动态内阻, 并设 V_p 为电源的端电压; 因电源具有稳流措施, 故可使回路限流电阻为零, 而回路恒流的获得是靠反馈控制网络随时根据负载阻抗的变化而调整 V_p 大小的。若串联两灯的电压降共为 V_L , 而其运转等效动态电阻为 r_L , 则电源的电压方程为

$$V_p = V_L + L \cdot \frac{dI}{dt} = V_s - I r_p \quad (1)$$

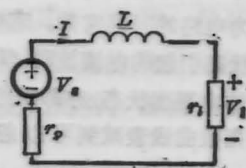
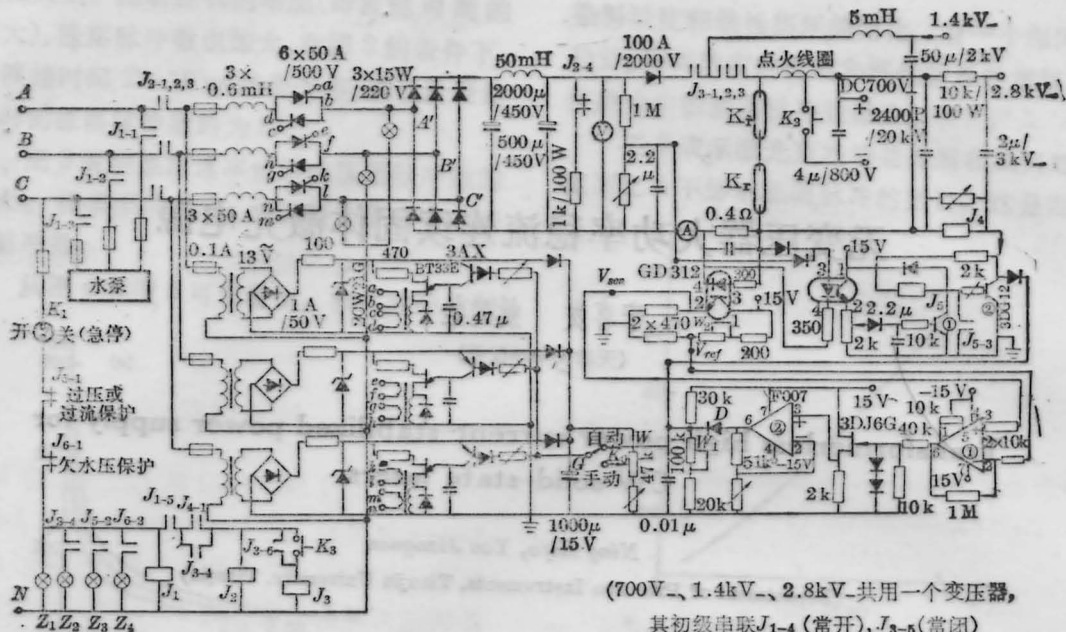


图 2



(700V、1.4kV、2.8kV-共用一个变压器，其初级串联J₁₋₄(常开)，J₃₋₅(常闭)

图3 电源原理电路图

式中 I 为灯的稳态电流， L 为与电源串联的滤波电感，而与电源并联的滤波电容则视为与 r_p 有关的一个电源参数。由(1)式可得如下方程：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V_p}{\partial I} = \frac{\partial [V_s - I r_p]}{\partial I} = -r_p \\ \frac{\partial V_L}{\partial I} = \frac{\partial [I r_L]}{\partial I} = r_L \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

对于灯的瞬态电流 i ， r_p 引起的电压变化 $i \cdot r_p$ 应为 r_L 引起的电压变化 $i \cdot r_L$ 与电感 L 上产生的瞬时电压 $L \cdot di/dt$ 之和，亦即

$$L \cdot \frac{di}{dt} + \left(\frac{\partial V_L}{\partial I} - \frac{\partial V_p}{\partial I} \right) i = L \cdot \frac{di}{dt} + k i = 0 \quad (3)$$

由(2)式得

$$k = \frac{\partial V_L}{\partial I} - \frac{\partial V_p}{\partial I} = r_L + r_p$$

为电路的稳定系数。(3)式为电源-氩灯系统的电平衡方程。方程(3)的通解为

$$i = e^{-k t / L} \cdot e^A$$

代入初始条件 $i(0) = \Delta I$ (为 $t=0$ 时的最大瞬时电流，亦即 $\Delta I = e^A$)，则上式变为

$$i = \Delta I \cdot e^{-t/T} \quad (4)$$

式中 $T = L/k$ 为电路的时间常数。若电路参数选得合适，使初始状态引起的电流波动 ΔI 逐渐消失，电路将进入稳定的电平衡状态，亦即瞬态电流 i 将以 T 为时间常数按指数曲线衰减到可以忽略不计的程度，故此要求

$$-t/T < 0 \quad \text{即}$$

$$k = r_L + r_p > 0 \quad (5)$$

(5)式为氩灯的稳流条件，亦即为电源参数与灯的伏安特性相匹配的条件。因氩灯工作在气体放电曲线的弧光放电区域，当处于非稳弧光放电时，灯的动态电阻具有负阻特性 ($r_L < 0$)，而当处于类稳大电流弧光放电时，则 r_L 可达十几欧到几十欧，例如当电流为 15A 时，测得双灯串联两端的电压降为 225V，此时 $r_L = 15\Omega$ 。由此可见具有很大的正、负值变化范围。为满足(5)式保证氩灯电流在任一瞬间均具有足够的稳定度，必须使下式成立：

$$r_p > |r_L|$$

为此，在不特别影响氩灯正常启动的前提下，应尽量减少负载一侧的滤波电容的容量，否则将导致减小甚至不满足(5)式；由此将造成动态稳流精度降低并使系统的稳定度校正困难等。实践表明，当电源的滤波电容减少到原来的 1/6 时，则电源的稳流精度大为提高。

三、各部分电路特点(参看图1、图3)

1. 触发、预燃及降压电路

该电路特点是，高压触发脉冲回路由点火线圈、氩灯和 2400P 高压电容组成。当氩灯触发预燃后预燃电流之分流通过继电器 J_4 线包足以使之动作。若灯预燃不正常， J_4 不动作就不可能接通三相电，由此保证了电源的逻辑程序。当 J_2 动作时，50μF 的

储能电容通过 5mH 电感对氩灯迅速放电(若无 5mH 电感易将辉光放电“吹灭”),使灯电压降至 350V 以下足以完成氩灯由辉光放电向弧光放电的转换。这就是降压电路之功能。

2. 可控硅三相交流输出调压器

该电路主要由分别串联在三相上的三对反并联可控硅和三套单结管振荡器组成。单结管电路的供电电源波形为梯形波,它们分别与相应的三相交流电同步。当 G 点电位由高逐渐降低时,三个三极管逐渐同步导通,三个单结管电路在各自的梯形波里产生的尖脉冲的相位逐渐前移,使三对交流调压可控硅的导通角均匀一致地逐渐增长。因此,使 A' 、 B' 、 C' 三端输出的正弦交流缺块波形的面积逐渐增大,即输出的三相交流电压逐渐增加;反之,当 G 点电位由低变高时,其输出电压也随之减小,直至为零。该调压器三相交流输出的任意两相波形均为幅度一致的交流缺块波形,其相位互差 120° 。该调压器具有如下特点:(1)三相输出的交流电压 $0\sim 370\text{V}$ 连续可调,而且对于电阻或电容性负载,波形基本无干扰;(2)它不同于通用的“可控硅三相全控整流调压”,这里的“可控硅三相交流输出调压器”恰好可取代极笨重的三相交流调压变压器而后者则不能,因为其输出为脉动直流缺块波形,所以其应用不如前者广泛,而且稳定性和抗干扰性能也不如前者。这是因为前者的输出端,对地而言均具有交流通路,可将一些干扰信号直接导入到地(中性线即为与大地相接的重复接地线)。后者的调压范围有限,远不如前者;(3)由于调压可控硅和各单结管电路中元器件参数的分散性,在输出电压的增长过程中,因可控硅各相导通角的增长速率不完全相同,所以引起输出电压的相对误差,即三相平均相对不平衡度,一般其值小于 0.03(主要由调节好坏而定)。但在某一个运转电压值上,三相可以达到均匀一致的平衡输出(可由各三极管的基极电阻调定)。

3. 过压及过流保护电路

过压取样由滤波电容的耐压而定,当主电压达 440V 时,取样分压为 20V;它作为光电耦合器“初级”回路的电压,通过其“次级”回路,使 3DG12①饱和导通,3DG12②截止,其输出为高电位,使三相可控硅的输出为零,即以电子运动速度切断三相电源;同时 J_5 动作,彻底切断电源给出指示(Z_3 亮)。过流保护:当灯电流为 50A 时,该光电耦合器“初级”回路的电压亦为 20V,同理亦使三相可控硅输出为零。

4. 负反馈控制电路

由 W_2 设定参考电压 V_{ref} ,亦即预置了氩灯工作电流;而取样电压 V_{sam} 由光电耦合器的 2 端输出。将二者之差输入电压比较器 F007①,再由 3DJ6G 源极输出,再经过同相输入比例放大器 F007② 以所要求之放大倍数加以线性放大,经线性放大后的输出电压,应使二极管 D 正向偏置有效。因此在调节稳定电流时,应先粗调 W_1 再细调 W_2 ,当调 W_2 时只要工作电流有变化,就说明负反馈控制网络起了作用,即能够稳流在所变化的电流范围之内。实验表明,这种调节方法较好,而且在全工作电流范围内均能达到稳流。该电源的稳流精度除了应满足(5)式而外,还主要取决于光电耦合器的线性特性、稳压电源的稳定性、取样电阻(这里用温度稳定性良好的锰铜合金丝)的温度稳定性、元器件的温度稳定性以及电路诸参数的合理性等。

对由图 3 所示的光电耦合器——GD312 所连接的电流取样电路,设 GD312 的“初级”回路电流为 I_f ，“次级”回路电流为 I_{co} ;当主回路负载电流 $5\sim 50\text{A}$ 变化,即取样电阻 (0.4Ω) 端电压的变化为 $2\sim 20\text{V}$ 时,实测 I_f 值的对应变化为 $2\sim 60\text{mA}$,测得 I_{co} 的对应变化为 $0.5\sim 28\text{mA}$,由此绘出 I_{co} 对于 I_f 的变化曲线,如图 4 所示。由图可见,当 $I_f=10\sim 50\text{mA}$,对应 $I_{co}=5.5\sim 19.5\text{mA}$ 时,该部分曲线段近似为直线,具有较好的线性度,可近似描述为:

$$I_{co} \approx 0.23I_f + 5.5(\text{mA}) \quad (10 \leq I_f \leq 50)$$

线性度较好的曲线段,恰好对应连续激光器的工作电流 ($13\sim 43\text{A}$),此段基本复盖整个有效工作电流

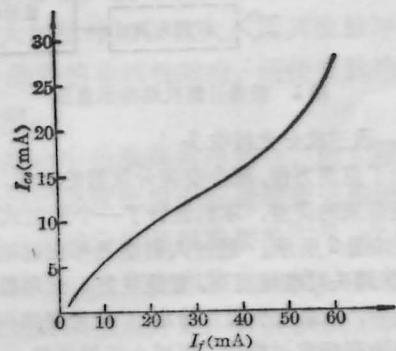


图 4

的调节范围 ($10\sim 45\text{A}$)。因此,使用 GD312 光电耦合器不仅起到类似变压器的隔离作用,而且还具有较为理想的线性度。

该电源在运转过程中,当外电网电压波动为 10% 时,测得电源的稳流精度约为 0.5%。

(收稿日期:1987年9月3日)