

大功率等离子体炬电源的研究

夏长远, 舒兴胜, 孟月东, 沈洁

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要:目前等离子体炬电源的移相触发电路大都是模拟式触发电路, 器件参数较为分散。针对其调试和使用不便, 产生的脉冲对称性差的缺点, 提出并研究了基于 CPLD 技术的数字式等离子炬电源, 介绍了大功率等离子炬电源的触发电路和控制回路。实验证明, 基于 CPLD 数字移相触发电路产生的触发脉冲稳定性好, 抗干扰性强, 能实现程序自适应。由于控制回路添加了 PID 调节环节, 在外干扰电压下, 等离子炬能稳定运行长达 2 小时左右, 功率达到 1.5MW, 具有效率高, 动态响应快的优点。

关键词: 电源 / 大功率; 等离子体炬; 触发电路

中图分类号: TN86

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2007)09-0077-02

The Study of High-power Supply of Plasma Torch

XIA Chang-yuan, SHU Xing-sheng, MENG Yue-dong, SHEN Jie

(Institute of Plasma Physics, HeFei 230031, China)

Abstract: Nowadays most trigger circuit of plasma torch power supply of our country are made of simulation device controlling. This system has many defects, such as dispersal of component parameter, inconvenient of the debugging and the use, bad symmetry of produced pulses. Consequently, focusing on the research of the digital power based on CPLD of plasma torch, a digital phase-shifted trigger circuit and the control-loop circuit of the high-power of plasma torch are introduced. The experimental results show that trigger pulses is very stable and have good anti-jamming and great phase sequence self-adapting, PID adjusting is adopted in control-loop, and plasma torch has been worked for about 2.0h, the power can achieve 1.5MW, and the circuit has high efficiency and fast response of dynamic.

Keywords: power supply / high power; plasma-torch; trigger circuit

1 引言

由等离子体炬引出的等离子体射流具有高热焓、高化学活性, 已被广泛应用于能源、材料的加工处理、冶金等领域, 如等离子体炬裂解煤制乙炔、薄膜沉积、材料改性、有毒废料处理、金属冶炼、切割等。在这些工艺过程中, 对等离子体的精确控制尤其重要, 它不仅影响着热流气体的温度和速度, 而且影响着等离子体的分布状态。通常, 为了保持工艺处理效果的稳定性, 等离子体必须具有稳定的参数, 这就要求等离子炬电源具有稳定的输出功率, 因此研制输出功率稳定的等离子炬电源是一个重要课题。在利用等离子体炬裂解煤制乙炔的实验中, 等离子体炬电源触发电路采用基于 CPLD 的数字移相控制技术, 控制电路采用了 PI 调节, 电源的输出电流达到 400A, 工作电压高达 4kV, 而且抗干扰性强, 稳定性好。

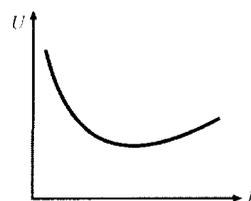
2 大功率等离子体炬的伏安特性

在等离子体裂解煤制乙炔实验中, 总是希望通过提高等离子炬中电弧的弧压来提高等离子炬的

放电功率, 以避免等离子炬中电弧电流强度过大而造成对炬阴极和阳极进地水冷难度。一般, 等离子体炬均具有图 1 所示的伏安特性^[1], 要使具有该特性的负载稳定工作, 必须要求电源具有陡降的输出伏安特性, 即陡降的外特性。因此, 所设计的等离子炬电源需工作在恒流方式, 电源系统具有陡降的外特性和良好的动态性。

3 等离子炬电源移相触发原理

等离子体炬电源主电路采用晶闸管控制。图 2a 示出等离子炬电源三相全控桥整流电路。三相全控桥式整流电路在任何时刻



都必须保证有两个不同组晶闸管同时导通才能构成回路, 换流只在本组内进行, 每隔 120°换流一次。由于共阴极和共阳极组的换流点相隔 60°, 所以每隔 60°有一个晶闸管换流, 同组内每个晶闸管的触发脉冲相位差为 120°, 而相邻两脉冲的相位差是 60°。图 2b 示出晶闸管触发脉冲顺序。

图 3 示出该数字移相触发电路^[2-5]的系统结构。将控制电压经过 U/f 转换器 (采用 CD4046 芯片) 得到脉冲作为计数脉冲, 在 CPLD 中使用 10 位计数器对其计数来控制触发脉冲的移相角, 脉冲频率越高

定稿日期: 2007-05-15

作者简介: 夏长远(1978-), 男, 安徽临泉人, 研究生, 研究方向为晶闸管电源在等离子体炬的应用。

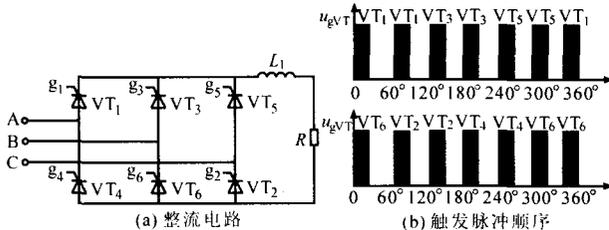


图 2 三相全控桥整流电路和双脉冲触发顺序

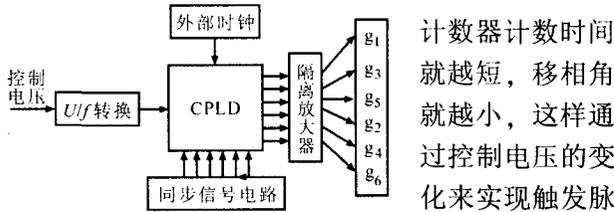


图 3 数字移相触发电路的系统结构图
计数器计数时间就越短,移相角就越小,这样通过控制电压的变化来实现触发脉冲的移相,移相角的范围约为 0~150°,图 3 中的 $g_1 \sim g_6$ 分别为 6 只晶闸管的触发极。

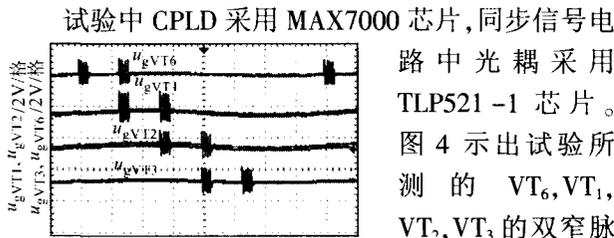


图 4 触发脉冲图(移相角 60°)

脉冲宽度为 0.9ms;各相脉冲不均衡度小于 1°(与电网电压的不对称度有关);移相范围为 0°~150°。

4 等离子体炬电源控制回路环节

图 5 示出等离子体炬电源系统传递函数模型。

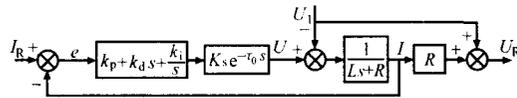


图 5 等离子体炬电源系统的传递函数模型

图中 $K_s e^{-s\tau_0}$ ——整流桥传递函数 K_s ——整流桥电压增益
 τ_0 ——整流桥的平均延时, $\tau_0=1.67\text{ms}$,
 I ——负载即等离子体炬的输出电流
 $1/(Ls+R)$ ——整流电压 U 到负载电流 I 环节的传递函数
 L ——滤波电感 R ——炬的动态电阻
 U_1 ——扰动电压 U_R ——负载炬电压

设定电流值 I_R 与输出电流 I 的采样值进行比较,产生误差信号 e ,经 PID 运算后给出相应的控制角 α 信号,该信号送入移相脉冲发生器产生控制角为 α 的触发脉冲,推动整流器工作。在 I 低于设定电流时减小 α ,以升高输出电压,反之则增大 α ,以降低输出电压,从而维持 I 的恒定。 I 与 U_1 ,即扰动-输出响应的关系为:

$$\frac{I}{U_1} = \frac{s^2 L + s / (L\tau_0)}{s^3 + (L + R\tau_0 + k_d) s^2 / (L\tau_0) + (R + k_p) s / (L\tau_0) + k_i / (L\tau_0)} \quad (1)$$

根据等离子体炬运行的部分实验数据发现,当

炬在 300~400A 之间时,炬的等效电阻 $R \approx -6 \sim -4\Omega$,这里选取 $R = -6\Omega$ 。已知 $L = 40\text{mH}$, $\tau_0 = 1.67\text{ms}$,选择 PID 参数 $k_d = 0.05$,则得特征方程为:

$$s^3 + 1.2 \times 10^3 s^2 + 1.5 \times 10^4 (k_p - 6) s + 1.5 \times 10^4 k_i = 0 \quad (2)$$

该方程有 3 个根,一般情况下为 1 个实根 s_1 , 2 个复根 $s_2 = a + jb, s_3 = a - jb$,为了使 s_1, s_2, s_3 对系统的影响尽可能小,则要求其离虚轴尽可能远,因此在极端情况下可选: $s_1 = a = -1.2 \times 10^3 / 3 = -400$ 。另一方面,由于复根的虚部使系统的响应发生振荡,为削弱这种影响,可选择 $b = |a| / 4 = 100$,于是根据 $1.5 \times 10^4 (k_p - 6) = s_1 s_2 + s_2 s_3 + s_1 s_3, 1.5 \times 10^4 k_i = -s_1 s_2 s_3$,选取 $k_p = 38.667, k_i = 4533.333$,可以算出扰动-输出的频域响应函数为:

$$\frac{I}{U_1} = \frac{25(-\omega^2 + j600\omega)}{(6.8 \times 10^7 - 1.2 \times 10^3 \omega^2) + j(4.9 \times 10^5 \omega - \omega^3)} \quad (3)$$

于是得到图 6 所示的幅频响应曲线。由图可见,系统对正弦扰动的抑制仍很好,扰动的最大响应不超过 0.05。图 7 示出 PID 参数为 $k_p = 0.05, k_d = 8, k_i = 85$ 条件下等离子体炬电流在较短时间内的真实波形。由图可见,电流中存在非 300Hz 的波动信号,推测它可能来源于炬工作状态的扰动。

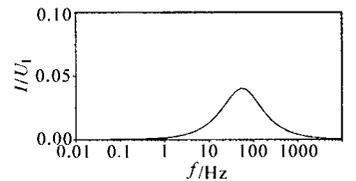


图 6 扰动-输出的幅频响应曲线

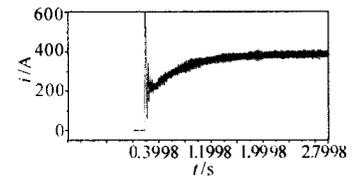


图 7 等离子体炬电流实验波形

5 结论

实验证明, CPLD 三相晶闸管电源触发电路应用技术可靠,产生的脉冲对称性好,抗干扰能力强,能可靠触发 3kA 以下晶闸管;控制回路采用了 PI 调节,在外干扰电压下,等离子炬稳定运行长达 2 小时,电源输出电流达到 400A,工作电压高达 4kV,功率达到 1.5MW,该电源已初步应用于中国科学院等离子体物理研究所“利用等离子体炬裂解煤制乙炔”项目。

参考文献

- [1] 过增元,赵文华.电弧和热等离子体[M].北京:科学出版社,1986.
- [2] 黄越辉,黄自龙,杨旭,等.基于 CPLD 的电力电子集成化控制器的研究[J].电力电子技术,2004,38(2):1~2.
- [3] 张均华,肖国春.基于 CPLD 的三相晶闸管数字移相触发器设计[J].工业加热,2004,33(5):1~3.
- [4] 杨媛,安涛,高勇,等.三相晶闸管移相触发器 IP 核的开发[J].电力电子技术,2003,37(4):1~3.
- [5] 吴坚,张茂青,等.基于专用芯片 TC787 的三相六脉冲晶闸管触发板的研制[J].电子技术应用,2003,29(5):1~3.