

# 高压 ECT 中激光供能电源的设计

段雄英, 吕斌, 邱红辉

(大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 辽宁 大连 116024)

Design of Optical Power Supply for High Voltage ECT

DUAN Xiong-ying, LU Bin, QIU Hong-hui

(Department of Electrical and Electronics Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**摘要:** 激光供能作为一种新的供能方式逐步为高压电子式电流互感器设计所采用。设计了一种用于高压电子式电流互感器的激光供能方案, 提出了一种激光供能与异步串行通信复用的功率激光器驱动方法, 具体给出了激光器的驱动电路、保护电路和自动恒温控制方案, 并在此基础上提出了 MCU 控制系统的模型。最后对高压侧的高效率光能-电能转换电路进行了设计。

**关键词:** 电子式电流互感器; 激光供能; 激光器驱动; 恒温控制

中图分类号: TM83 文献标识码: A

**Abstract:** Optical power supply is adopted gradually in high voltage electronic current transformer as a new method of power supply. This paper presents a scheme of optical power supply in ECT, proposes a drive method combined by laser power supply and serial communication. The driving and protecting circuit as well as automatic constant temperature control system of LD are given, and the model of MCU control system is set up. Finally, the design of the efficient optical-electric converting circuit at high voltage side is carried out.

**Key words:** electronics current transformer(ECT); optical power supply; laser driven; constant temperature controlling

## 0 引言

目前, 高压电子式电流互感器(ECT)主要采用两种供能方式: 一种是母线供能, 利用电磁感应原理, 通过铁磁式互感器从高压母线上感应交流电压, 然后经过整流、滤波、稳压后为高压侧信号采集系统供电, 这种方式中电源与信号采集系统同在高压侧, 不存在绝

缘问题。但是另一方面, 这种供电方式存在死区, 当母线电流特别小的时候无法提供足够的电能; 并且母线电流变化范围大(几安到数千安), 以10 kV 电压等级额定电流为 400 A 为例, 母线稳态电流可以在 5%~120%额定电流范围内变化, 在短路故障情况下, 母线暂态电流可达到额定电流的 10 倍甚至更高。在如此大的电流变化范围内, 很难保持电源的稳定<sup>[1-2]</sup>。另外一种为低压侧激光供能, 它的特点是电源结构简单, 工作可靠性高, 电源不受电网电流大小的影响, 而且不存在死区。但是激光器(LD)的发光波长和输出功率都随温度变化而变化, 影响供电系统的稳定性, 因此要设计温度控制电路使激光器工作在稳定的温度以输出恒定光功率<sup>[3]</sup>。

本文针对提高激光供能的可靠性提出了一种实用方案, 以 MCU 为核心实现对功率激光器的载波驱动和温度控制, 完成了高压侧光能-电能的高效率转换电路的设计, 并进行了相关实验。

## 1 系统结构

激光供能系统的原理见图 1, 它由低压侧和高压侧两部分组成: 低压侧为激光器及其驱动、保护和温控电路, 高压侧电路由光电池和 DC-DC 变换器组成。在低压侧, 利用激光器将电能转换成光能, 然后

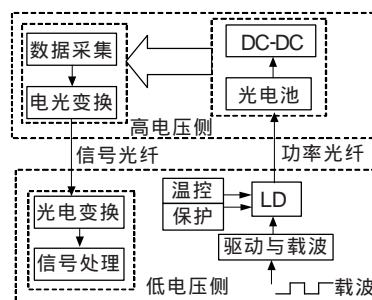


图1 系统结构图

收稿日期: 2006-03-25; 修回日期: 2006-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50447006)。

作者简介: 段雄英(1974-), 女, 副教授, 主要从事智能化电器方面的研究。

利用光纤将光能传递到高压侧。高压侧的光电池将光能转换为电能,经过DC-DC变换后给高压侧的信号采集系统供电<sup>[1-2]</sup>。

## 2 激光器驱动电源

该电源系统采用SPL2F81型激光器,内部集成负温度系数的热敏电阻,便于温度控制。通过调节激光器的电流大小可以调节输出光功率的大小。激光器的最大驱动电流为2.7A,可输出1.7W的光功率。

### 2.1 激光器驱动电路

为了将光能传输和异步串行通信结合起来,设计了一种可以实现载波驱动的恒流源电路,其脉冲电流的频率可达100kHz。这样可以将对数据采集系统的控制信息以光脉冲的形式传到高压侧,减少了信号光纤和光电转换器件,也降低了高压侧的功耗。信息传送使用曼彻斯特编码,可以使平均能量不变,在信息传递的同时,保证高压侧电源正常工作。其电路原理图见图2。该电路以大功率MOS管为核心元件,3个放大器构成驱动和负反馈回路, $R_s$ 是采样电阻<sup>[4]</sup>。

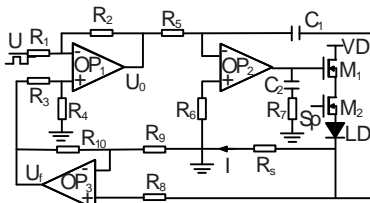


图2 LD的驱动电路

系统的输入控制信号与激光器电流的关系可由下列计算得到:设激光器电流为 $I$ ;控制信号为 $U$ ;  $OP_3$ 的输出电压为 $U_i$ ;  $OP_1$ 的输出电压为 $U_o$ 。根据放大器工作原理,则有:

$$U_i = R_s I \left( 1 + \frac{R_{10}}{R_9} \right) \quad (1)$$

$$U_o = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_i - \frac{R_2}{R_1} U \quad (2)$$

而系统达到平衡的条件是:

$$U_o = 0 \quad (3)$$

将式(1)~式(3)联立解得式(4):

$$I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{R_s} \cdot \frac{R_9}{R_{10} + R_9} \cdot \left( 1 + \frac{R_3}{R_4} \right) U \quad (4)$$

### 2.2 实验与数据分析

首先,根据激光器的驱动要求,用Pspice对电路进行了仿真研究,然后在实际电路试验的基础上完成具体元器件的参数整定。其中,控制信号 $U$ 与激光器驱动电流 $I$ 的关系设定为: $I=1/2U$ 。

图3给出了在室温下测得采样电阻 $R_s$ 上的电压波形,由此可以推断通过激光器的电流波形。图中理想的方波 $U$ 是驱动信号,每格5V,另一个是采样

电阻上的电压波形 $U_{Rs}$ ,每格0.5V,时间轴每格2 $\mu s$ 。实验表明该驱动电路可以产生高达100kHz的方波,能够实现异步串行通信,驱动电流幅值可以达到5A,平均值为2.5A,满足激光器高能量输出对驱动电流幅值的要求。

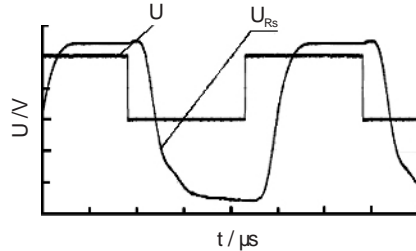


图3 控制信号 $U$ 与采样电压 $U_{Rs}$ 波形

波形的上升与恢复时间由系统总的时间常数 $RC_1$ 决定, $R$ 不变,若 $C_1$ 过小,系统会产生高频自激,使电流波形发生畸变;而 $C_1$ 过大,时间常数过长会使波形接近锯齿波,没有平稳的波峰,得不到较理想的平顶脉冲波形。经过多次试验研究发现,取 $C_1$ 为75pF时,波形较为理想。由于激光器通过的是数安的电流脉冲,如果不加以限制,电流上升沿产生的严重过冲会损坏激光器。图2中 $R_7$ 与 $C_2$ 能够滤除MOS管栅极控制信号中的高频电压过冲,起到消除电流过冲的作用,在不影响激光器正常工作的同时实现数据异步串行通信。

当控制信号 $U$ 保持恒定时,该电路亦可作为激光器的恒流驱动电路,其输出电流精度可达0.2%。为保护激光器并延长其工作寿命,平均驱动电流应控制在2.3A以下,这时光功率输出约为1.5W。

### 2.3 激光器的过流保护

瞬时电流冲击或长时间工作于较大的电流下,都会影响激光器的使用寿命甚至损坏激光器,因此要设计过流保护电路对激光器电流加以限制。图4给出了用于激光器过流保护的试验电路图。此电路以RS触发器为核心器件,前端是比较器,产生过流的触发信号,后端电路将触发信号反转和放大,通过控制激光器电流通路上的一个起开关作用的MOS管 $M_2$ 的通断,对过流的激光器施以保护。

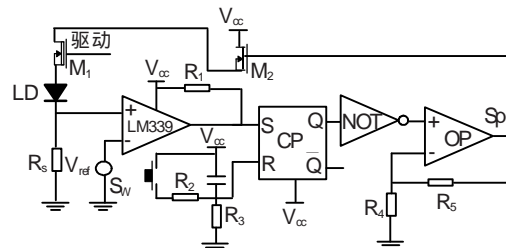


图4 LD的过流保护电路

触发器的时钟输入端CP始终连接高电平,使得触发器可以随时触发。RS触发器的真值表见表1。

从表1可知,系统上电复位后,保护电路输出

表 1 RS 触发器真值表

R	S	Q <sup>n+1</sup>
0	0	Q <sup>n</sup>
0	1	1
1	0	0
1	1	不定

S<sub>p</sub> 为高电平, M<sub>2</sub> 导通, 可使激光器驱动电路正常工作。由于电容的作用, R 端降至低电平后, RS 触发器处于保持状态, M<sub>2</sub> 仍旧导通; 激光器通路出现过电流, 采样电阻 R<sub>s</sub> 上的电压值超过保护设定值时, 比较器输出高电平, 触发器置位, 输出 S<sub>p</sub> 变为低电平, M<sub>2</sub> 截止, 激光器被断开, 起到保护作用。复位开关 S<sub>w</sub> 用来实现激光器保护电路复位。

保护电路中必须选用快速器件, 响应速度反映快, 才可以更好地起到保护的作用。激光器的过压保护采用相似的原理, 这里不再介绍。

### 2.4 激光器的自动温度控制

激光器工作温度的变化会引起输出波长的波动, 影响功率的输出, 这些不稳定因素给高压侧电源部分的稳定性带来不良影响, 而且温度过高会加快激光器的老化甚至损坏。以下提出了一种自动温度控制方案, 可以保证激光器在固定的温度范围内工作。

该电路以大功率 MOS 管驱动的热电制冷片 (TEC) 为主要器件, 利用激光器内的负温度系数热敏电阻 (NTC) 将其温度变化反馈给控制电路, 而后采用 PI 控制原理达到稳定控制温度的目的, 其结构见图 5。

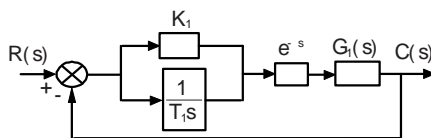


图 5 自动温控电路结构图

其中: K<sub>1</sub> 是比例系数; T<sub>1</sub> 为积分的时间常数; e<sup>s</sup> 是系统的滞后环节; G<sub>1</sub>(s) 是制冷片及控制对象的动态特性环节。根据受控对象的动态特性, 确定 G<sub>1</sub>(s) 的表达式为:

$$G_1(s) = \frac{K_2}{s(T_2s+1)}$$

其中: K<sub>2</sub>=0.003 125, T<sub>2</sub>=0.01。由于温度控制环节的纯滞后性质, 系统中存在一个滞后环节, 系统滞后时间常数 =8 s, 系统的开环传递函数为:

$$G(s) = (K_1 + \frac{1}{T_1s}) e^{-s} G_1(s)$$

则系统的闭环传递函数为:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{(K_1 + \frac{1}{T_1s}) e^{-s} G_1(s)}{1 + (K_1 + \frac{1}{T_1s}) e^{-s} G_1(s)}$$

根据 e<sup>-x</sup> 的派德近似式取:

$$e^{-s} \approx 1 - s + \frac{(s)^2}{2} = 1 - 8s + 32s^2$$

将对应参数代入闭环传递函数, 并按照 s 的降幂排列得系统的特征方程:

$$(1+10K_1)s^3 + (100-2.4K_1 + \frac{10}{T_1})s^2 + 0.3125(K_1 + \frac{8}{T_1})s + \frac{0.3125}{T_1} = 0$$

根据劳斯判据及不等式原理, 可以得出使系统能够稳定工作的 K<sub>1</sub> 和 T<sub>1</sub> 的范围: 0 < K<sub>1</sub> < 121.66, 而 T<sub>1</sub> > 0.092<sup>[5]</sup>。

虽然说增大比例系数可以提高系统的响应速度, 减小残差, 但是比例系数过大, 偏差很小时, 调节量就已超出了控制器的输出范围, 也就是控制信号达到了饱和, 比例环节就不再起作用了, 因此, 比例系数不宜过大<sup>[6]</sup>。它主要由控制系统中器件特性及系统允许的偏差的范围决定, 这里取 K<sub>1</sub>=50, 另外根据劳斯判据:

$$K_1 - 8\frac{1}{T_1} > 0$$

可以得到: T<sub>1</sub> > 0.16, 取 T<sub>1</sub>=0.2。实验表明该自动温控方案可以使激光器工作在室温下 25 ± 0.2 范围内。

### 2.5 MCU 控制系统设计

为提高系统的控制精度, 并对系统的各项参数进行实时监控, 进一步设计了 MCU 控制系统。这部分以 MSP430 系列单片机为核心。该系列单片机是一种 16 位、具有精简指令集、超低功耗的混合型单片机, 在其内部集成了 A/D、D/A、硬件比较器、硬件乘法器、LCD 驱动等功能模块, 提高了自身的功能密度, 简化了外围电路<sup>[7]</sup>。

系统的结构见图 6<sup>[8]</sup>, 以 MSP430 系列单片机为主控制器, 键盘可以对控制信号进行控制和调节; 激光器的温度信号经过外围电路转换成电信号, 再经过单片机内部的 A/D 模块转换成数字信号, 经过运算, 确定数字温度控制的参量, 由内部 D/A 转换成模拟信号控制制冷片 (TEC) 工作, 调节激光器的工作温度。通过数字信号处理可以实现对激光器工作温度的精确控制<sup>[9-10]</sup>。

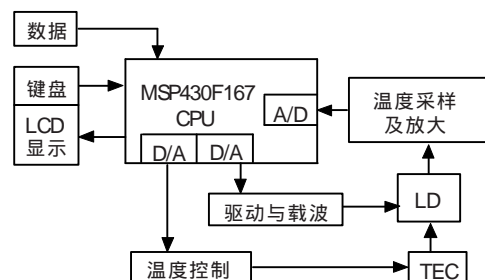


图 6 MCU 控制框图

### 3 高压侧光电转换电源设计

高压侧信号处理系统采用低功耗微处理器, 工作电压 3.3 V, 模拟、调制电路及信号采集系统都采用低功耗元件, 单电源 3.3 V 供电。这样, 高压侧光电转换电源提供 3.3 V 的稳定输出, 就可以满足高压侧供能的需要。

光电转换器采用的是 PPC-6E 型光电池, 输出 6 V, 转换效率在 26% 以上。光能传输过程中的损耗主要由两部分构成: 光纤的衰减损耗和光纤衔接处的插入损耗。以现在的光纤技术, 每公里衰减损耗可以达到小于 0.1 dB<sup>[1]</sup>, 插入损耗小于 0.2 dB。考虑上述因素, 经传输、变换后光电池的输出功率可达 350 mW。

由于激光器提供的光能有限, 并且光纤传导存在损耗及光电池的转换效率较低, 为减少不必要的损耗, 高压侧系统采用高效率电源器件配合低功耗电路设计, 其结构见图 7。

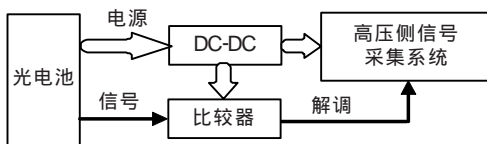


图 7 高压侧供能简图

DC-DC 采用高效率, 外围电路简单的转换芯片, 输入 3.6 ~ 6 V 电压, 一方面降低电源自身损耗, 另外较宽的输入范围更能提高输出的稳定性。比较器接收到数据信号, 将其解调为理想的方波信号送到处理器解码, 进行后续控制。低功耗的高压侧处理电路设计, 只需要 150 mW 以下的电能就可以工作, 这样, 即使光电池转换效率受到温度等因素的影响而产生波动也不会影响高压侧系统的正常工作。

为验证高压侧电源稳压输出的稳定性, 用电阻作为输出的负载进行了温度实验, 实验结果见图 8。

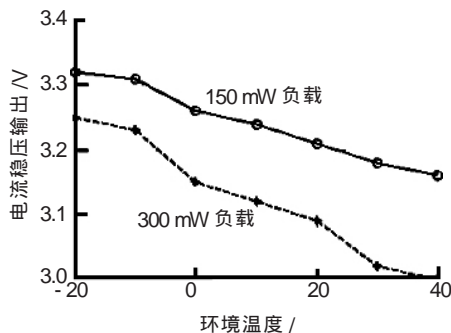


图 8 电源稳压输出温度特性曲线

图中分别给出了功率为 300 mW 和 150 mW 时

电源电压温度曲线, 负载电阻对应分别为 37 和 73  $\Omega$ , 由于条件限制只完成了 -20 ~ 40 温度范围内的实验。实验结果表明: 电源输出电压随温度的升高略有降低; 当输出功率为 150 mW 时输出电压在 3.15 V 以上, 能够满足信号采集系统的供电需要。

光电池的工作温度不能太高, 因为它的晶格容易受到高温损坏而引起器件的失效<sup>[12]</sup>, 因此光电池需要加散热装置工作, 使它的工作温度不超过 125  $^{\circ}\text{C}$ 。而且, PPC 的效率只有 40%, 60% 的能量需要以热的形式散失出去。在激光器大电流驱动下, 光电池有较明显的热效应, 散热装置(如大功率散热片)有利于降低光电池温度, 提高输出电压, 从而提高光电转换效率。

### 4 结语

提出一种用于高压 ECT 激光供能的方案, 实现了光能的传输和异步串行通信的结合。以 MSP430 微控制器为核心, 可实现对激光器驱动及数字恒温控制。进行了高压侧电源稳压输出的温度实验, 验证了电源在一定负载及温度范围内供能的稳定性。

### 参考文献:

- [1] 周新启, 刘会金, 郑 莎. 混合式光电电流互感器高压侧的电源方案研究[J]. 继电器, 2005, 33(18): 71-74.
- [2] 张 曦, 张庆伟, 张源斌. 混合式 OCT 高压侧电路的供电方式[J]. 高电压工程, 2002, 28(12): 14-35.
- [3] 付 烈. 混合式光纤电流互感器电源的研究 [D]. 北京: 燕山大学, 2004.
- [4] 邓 军, 单江东, 张 娜, 等. 大功率半导体激光器驱动器的研究与设计[J]. 半导体光电, 2003, 24(5): 319-370.
- [5] 沈绍信, 王金城, 李亚芬. 自动控制原理 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1997.
- [6] 金以慧. 过程控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [7] 胡大可. MSP430 系列超低功耗 16 位单片机原理与应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.
- [8] 吴士普, 刘 沛, 徐 雁, 等. 光电电流互感器中的光供电技术应用研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 52-55
- [9] 绍 红, 李川香. 一种基于 Fuzzy-PID 的温度控制系统[J]. 自动化仪表, 2002, 23(9): 70-72.
- [10] 蒋和伦. 一种大功率半导体激光器恒温控制系统的设计[J]. 光电技术应用, 2004, 25(4): 320-322.
- [11] 王延恒. 光纤通讯技术基础 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1993: 182-186.
- [12] 李 澎. 光电电流互感器供电电路的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2003.

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!