

# 高可靠脉冲氙灯电源设计

陈奇,洪峰,邵栋伟,胡翔宇

(南京航空航天大学 电子信息工程学院,江苏 南京 211106)

**摘要:**脉冲氙灯因光谱与太阳光最为相近,常用于太阳能电池的性能测试。脉冲氙灯电源是保证脉冲氙灯可靠工作、提高光电转换效率的关键因素。为解决传统脉冲氙灯电源体积大、噪声干扰大、可靠性低等问题,设计了一款高可靠的脉冲氙灯电源,电源采用交错并联 Buck 电路构成的脉冲发生电路有效减小了输出纹波,采用改进型嵌套工作时序的数字控制方案提高了脉冲氙灯工作的可靠性。通过搭建实验样机并进行测试研究,结果表明所设计的脉冲电源可以使脉冲氙灯百分百点亮并能稳定工作。

**关键词:**脉冲氙灯;高可靠性;交错并联 Buck

**中图分类号:**TM923 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24184

## Design of High Reliability Pulse Xenon Lamp Power Supply

CHEN Qi, HONG Feng, SHAO Dongwei, HU Xiangyu

(School of Electric Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China)

**Abstract:** Pulsed xenon lamp is often used for performance testing of solar cells because its spectrum is most similar to sunlight. The pulsed xenon lamp power supply is the key factor to ensure the reliable operation of the pulsed xenon lamp and improve the photoelectric conversion efficiency. In order to solve the problems of the traditional pulsed xenon lamp power supply with large volume, large noise interference and low reliability, a high-reliability pulsed xenon lamp power supply was designed. Staggered parallel Buck was adopted to reduce the output ripple, and the digital control scheme of the improved nested working sequence was used to improve the working reliability of the pulsed xenon lamp. By building an experimental prototype and testing, it is proved that the pulsed power supply can make the pulsed xenon lamp light up 100% and keep working stably.

**Key words:** pulse xenon lamp; high reliability; staggered parallel Buck

随着电源技术的发展,光电技术的应用日益成熟,气体放电灯中的脉冲氙灯因光谱与太阳光接近、发光强度高、单次脉冲功率高而平均功率低等优点,常常用于太阳能电池性能测试。脉冲氙灯电源结构如图 1 所示,主要由储能电容、高压触发电路和脉冲发生电路组成<sup>[1-2]</sup>。

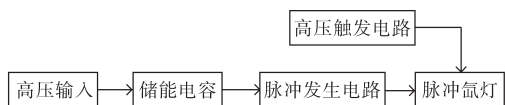


图1 脉冲氙灯电源结构图

Fig.1 Structure of pulsed xenon lamp power supply system

高性能的脉冲氙灯电源可以确保氙灯工作稳定,提高光电的转换效率。开关电源中的 Buck 电路因为结构简单、控制容易实现且符合脉冲氙

灯降压工作场景,所以脉冲氙灯电源中的脉冲发生电路常采用 Buck 电路来设计。传统的高压脉冲电源多采用单路电源结构设计脉冲发生电路,单路电源的体积大,滤波电路设计较为困难,且噪声干扰较大,会影响脉冲氙灯正常工作。为解决这些问题,本文采用交错并联 Buck 电路来设计脉冲发生电路,并采用一种嵌套工作时序确保脉冲氙灯能够可靠点亮并稳定地工作。

## 1 脉冲氙灯介绍

脉冲氙灯分为外触发和内触发两种类型,常用的外触发型脉冲氙灯结构如图 2 所示,其中,A 和 B 分别为脉冲氙灯的阳极和阴极,C 为脉冲氙灯的触发端,D 为氙灯的外壳,E 为氙灯内部填充

的氙气,实际根据内部填充气压的不同,脉冲氙灯的光强和应用场合不同。

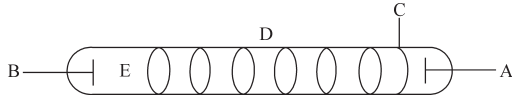


图2 脉冲氙灯结构图

Fig.2 Pulsed xenon lamp structure

脉冲氙灯工作过程包括启辉、预燃和续流放电三个阶段。在启辉阶段内,高压触发信号加在脉冲氙灯的触发端,使氙气分子电离出电子、离子,产生辉光;在预燃阶段内,高于脉冲氙灯着火电压的输入电压直接加在脉冲氙灯两端,使灯管内的氙气继续电离,形成低阻值的“等离子通道”,此时脉冲氙灯将从辉光放电过渡到稳定的弧光放电状态;在续流放电阶段内,脉冲氙灯电源通过续流维持氙灯内的放电通道,进行持续弧光放电,释放巨大的光能<sup>[1]</sup>。

脉冲氙灯在点亮过程中其两端的电压、电流有着非常大的变化,是一个非稳态气体放电过程。在从最初的火花放电到稳定弧光放电的过程中,氙灯的等效阻值随时间递减,其放电过程并不能等效为一个恒定阻值的导体。当进入稳定的弧光放电阶段时,氙灯两端电压、电流关系可表示为

$$V = K_0 \times i^{0.5} \quad (1)$$

其中

$$K_0 = 1.28 \frac{l}{d} \left( \frac{P}{450} \right)^{0.2}$$

式中: $i$ 为流过脉冲氙灯的电流; $K_0$ 为脉冲氙灯的阻抗特性,与脉冲氙灯的尺寸和灯管内部的填充气压有关; $P$ 为氙灯内部的气压; $l$ 为氙灯灯管的长度; $d$ 为氙灯的内径。

在稳定弧光放电时间内,脉冲氙灯可等效为一恒定电阻,其阻值为

$$R_L(i) = K_0 \times i^{0.5} \quad (2)$$

## 2 脉冲氙灯电源设计

### 2.1 高压触发电路设计

脉冲氙灯电源中的高压触发电路用于产生 kV 级别的高压信号,使脉冲氙灯内部氙气电离,产生辉光放电<sup>[4]</sup>。所设计的高压触发电路如图 3 所示,主要由前级的升压储能电路和后级的高压放电电路两部分组成。升压储能电路可将 15 V 的输入电压经变压器  $T_1$  升压至 300 V 给电容  $C_1$  和电容  $C_3$  充电储能,前级电路采用 TL431 和光耦组

成的反馈控制电路来实现 300 V 的稳压输出;后级的高压放电电路主要由开关管  $Q_2$ 、储能电容  $C_3$  和变压器  $T_2$  组成,当高压触发模块接收到触发信号时,开关管  $Q_2$  导通,储能电容  $C_3$  直接通过变压器  $T_2$  高压放电,产生 kV 级别的高压脉冲使氙气分子电离,产生辉光。

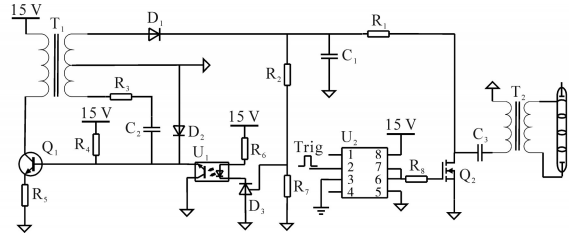


图3 高压触发电路

Fig.3 High voltage trigger circuit

### 2.2 脉冲发生电路设计

脉冲氙灯电源中的脉冲发生电路如图 4 所示,可用于脉冲氙灯的预燃和续流放电工作阶段。

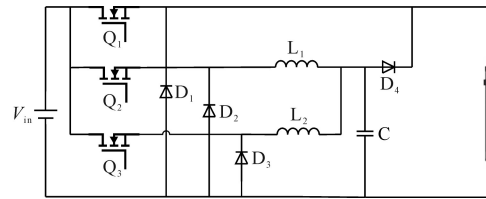


图4 脉冲发生电路

Fig.4 Pulse forming circuit

在预燃阶段,开关管  $Q_1$  导通,输入高压  $V_{in}$  直接加在脉冲氙灯两端使灯管内氙气完全电离,维持氙气分子被预电离的状态,此时氙灯的光强将从启辉阶段的辉光过渡到弧光阶段;当开关管  $Q_1$  关断后,二极管  $D_1$  为线路上的寄生电感提供续流回路,防止线路上的寄生电感产生高压击穿功率器件。

在续流放电阶段,脉冲发生电路中的两路交错并联 Buck 电路输出恒定电流的脉冲来维持氙灯点亮状态。相较于单路电源续流方式,两路并联结构可降低功率器件电流应力要求,同时负载功率由两路电路共同提供,单路电源模块更容易设计,适用于大电流场合。同时因为电路采用交错并联结构,开关管  $Q_2$  和  $Q_3$  的驱动信号错相  $180^\circ$ ,使得两路电感电流纹波的峰值与谷值可相互抵消,从而减小总的输出纹波。因此,脉冲氙灯电源采用交错并联结构可解决输出纹波大、滤波网络难设计等问题,有效提高系统的可靠性<sup>[5-7]</sup>。

### 2.3 嵌套式工作时序设计

脉冲氙灯的工作过程涉及到触发、预燃和续流三个工作阶段的切换,对电源的时序控制要求较高。传统脉冲氙灯电源工作时序中触发、预燃

和续流的驱动信号依次顺序进行,这种工作情况下脉冲氙灯可能因为时序衔接不及时导致内部导电回路消失,不能成功点亮。

为实现脉冲氙灯各个工作阶段的平稳过渡,本脉冲氙灯电源的上电时序采用嵌套结构,嵌套时序控制如图5所示。在触发信号 $t_3$ 工作之前,脉冲氙灯为高阻态,可等效为断路状态;当触发信号工作时,高压触发电路使氙灯内部部分氙气分子电离,形成导电通道并产生辉光;当触发阶段结束后,在预燃信号 $t_2$ 工作时间内,氙灯两端预燃高压使得氙灯内氙气完全电离,此时脉冲氙灯为低阻导通状态并进入弧光放电阶段;当预燃信号 $t_2$ 结束后,续流放电阶段 $t_1$ 开始工作,此时将由两路交错并联 Buck 电路实现续流脉冲工作。以上便是嵌套时序控制的工作过程。

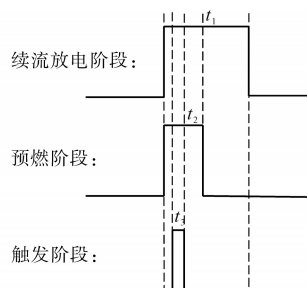


图5 工作时序图

Fig.5 Working sequence diagram

相较于传统脉冲氙灯电源各工作阶段依次进行的时序设计,所设计的嵌套结构的上电时序可使脉冲氙灯的工作状态实现顺利过渡,保证脉冲氙灯百分百被点亮。

### 3 电路参数设计

脉冲氙灯电源的主要设计参数如下:输入电压 1 050 V,额定输出电流 100 A,单个支路电流 50 A,开关频率 20 kHz,脉冲氙灯等效阻值 4  $\Omega$ 。

脉冲电路进入弧光放电状态后将由两路交错并联 Buck 电路输出恒定脉冲电流维持脉冲氙灯点亮状态,此处重点介绍电路中滤波电感的设计。由于 CCM(continuous current mode)模式下功率元件的电流应力要求低,同时传递函数易分析,所以交错并联 Buck 电路按照满载状态下处于连续工作模式进行设计。CCM 模式下,Buck 电路的传递函数为

$$V_{out} = D \times V_{in} \quad (3)$$

式中: $V_{in}$ 为输入电压; $V_{out}$ 为输出电压; $D$ 为占空比。

Buck 电路中,电感计算公式为

$$L = \frac{(V_{in} - V_o)}{i_L} \times DT \quad (4)$$

式中: $i_L$ 为电感电流纹波; $T$ 为开关周期。

电感电流纹波按照输出电流的 20% 计算,结合主电路设计参数的指标要求,代入式(3)、式(4)可计算得到电感值为 1.2 mH。

Buck 电路中,输出滤波电容计算公式为

$$C_{min} = i_L / (8fV_r) \quad (5)$$

式中: $f$ 为开关频率; $V_r$ 为输出电压允许纹波,设为 1 V。

根据式(5)可计算得到最小滤波电容值为 62  $\mu$ F,实际电路中电容取值可为 100  $\mu$ F。

脉冲发生电路中的开关管选用 IXYS 公司的 IXYS50N170C,其耐压值为 1 700 V,耐流值为 50 A;电路中的续流二极管选用的是肖特基二极管,型号为 UJ3D1250K,二极管的耐压值为 1 250 V,正向耐流值为 50 A。

## 4 仿真和实验分析

### 4.1 电路仿真分析

利用 Simulink 仿真软件对脉冲发生电路中的交错并联 Buck 电路进行验证,仿真电路如图6所示,电路中电感值为 1.2 mH,输出滤波电容取 100  $\mu$ F,脉冲氙灯负载用 4  $\Omega$  的电阻等效代替。仿真波形如图7所示,仿真结果证明交错并联结构可使输出纹波减小,设计方案可行。

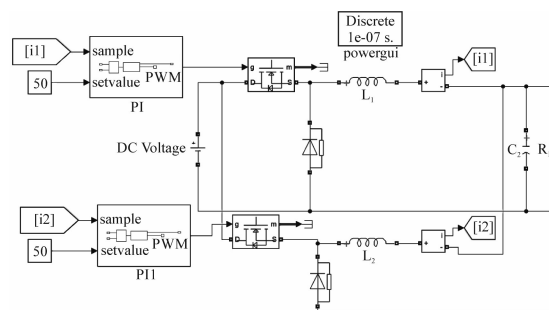


图6 仿真电路图

Fig.6 Simulation circuit diagram

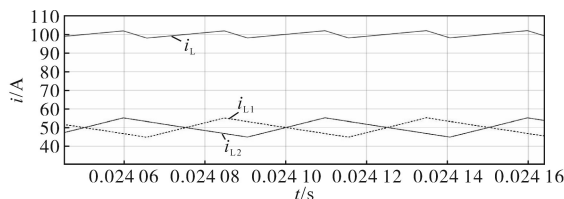


图7 交错并联电感电流纹波仿真波形图

Fig.7 Simulation results of staggered parallel Buck converter

### 4.2 实验结果分析

为进一步验证电路设计的合理性,搭建了实

验平台并进行测试研究,实验中使用脉冲氙灯作为负载,设置脉冲工作频率为1 Hz,续流放电阶段的脉冲宽度为18 ms。

图8为脉冲发生电路中两路交错并联Buck电路的实验波形图,从上到下分别是第一支路驱动波形 $V_{Q1GS}$ 、第二支路驱动波形 $V_{Q2GS}$ 、总输出电感电流纹波 $i_L$ 、第一支路输出电感电流纹波 $i_{L1}$ 。经对比图7和图8可发现实验测试波形和仿真结果相近,单路Buck电路的输出电感电流纹波都为10 A左右,在经过交错并联叠加后总的输出电感电流纹波可减小到6 A左右,证明了交错并联结构可有效减小输出纹波,改善电路特性,验证了设计方案的可行性。

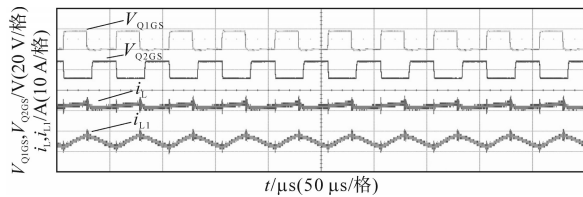


图8 交错并联Buck实验波形

Fig.8 Experimental results of staggered parallel Buck converter

图9为脉冲氙灯工作波形,从上到下依次为预燃信号驱动波形 $V_{Trig}$ 、输出电压波形 $V_o$ 、单路电感电流波形 $i_{L1}$ 。由图中波形可知,脉冲氙灯可实现三个工作阶段的平稳过渡,成功点亮脉冲氙灯并实现稳定的恒流脉冲工作。

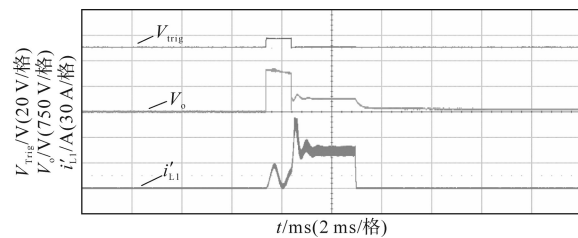


图9 脉冲氙灯实验波形

Fig.9 Experimental results of pulse xenon lamp

图10为不同输出电流情况下脉冲氙灯等效阻抗图。由曲线图可知,脉冲氙灯为负阻抗特性,输出电流越大时,脉冲氙灯等效电阻 $R_L$ 值越小。经比较发现,实验得到的脉冲氙灯等效阻值与式(2)中理论计算结果一致,验证了脉冲氙灯的阻抗特性公式的合理性。

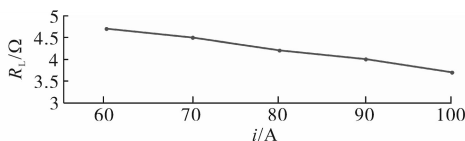


图10 脉冲氙灯等效阻抗曲线图

Fig.10 Pulse xenon lamp equivalent impedance curve

## 5 结论

本文为解决传统脉冲氙灯电源可靠性低、工作不稳定等问题设计出一种新型脉冲氙灯电源,所设计的新型脉冲氙灯电源采用交错并联Buck电路,能够有效减小输出纹波,改善电路波形质量,同时采用一种改进型的嵌套工作时序确保了脉冲氙灯百分百被点亮,使电源工作更加可靠。

### 参考文献

- [1] 李波,李博婷,黄斌,等.高可靠性脉冲氙灯电源设计[J].强激光与粒子束,2017,29(6):36-40.  
LI Bo, LI Boting, HUANG Bin, et al. Design of high reliability pulsed xenon lamp power supply[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(6): 36-40.
- [2] SONG S H, CHO C G, PARK S M, et al. Comparative study of pulse trigger and DC trigger circuit for xenon flash lamp drivers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(2): 397-404.
- [3] 邵若燕,刘建军,吴睿骅,等.脉冲氙灯电源研究[J].强激光与粒子束,2019,31(2):12-16.  
SHAO Ruoyan, LIU Jianjun, WU Ruihua, et al. Pulsed xenon lamp power supply[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(2): 12-16.
- [4] 陈朋,毛待春,陈思逾,等.基于反激拓扑与RC隔离触发网络的短弧脉冲氙灯电源设计[J].强激光与粒子束,2021,33(3):119-127.  
CHEN Peng, MAO Daichun, CHEN Siyu, et al. Design of short-arc xenon flashlamp power supply based on flyback topology and RC isolation trigger network[J]. High Power Laser and Particle Beam, 2021, 33(3): 119-127.
- [5] 栾晓腾,段福兴,夏东伟.基于SiC器件的大功率交错并联Buck电路[J].电源学报,2018,16(1):90-94,98.  
LUAN Xiaoteng, DUAN Fuxing, XIA Dongwei. High-power interleaving Buck circuit based on SiC device[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(1): 90-94, 98.
- [6] 高青.低纹波输出的多相交错并联Buck变换器研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.  
GAO Qing. Research on multiphase interleaving Buck converter with low ripple[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [7] 孙伟男,戴云聪.一种交错并联DC-DC变换器数字优化控制方法[J].电气传动,2018,48(1):32-35,59.  
SUN Weinan, DAI Yuncong. Interleaved parallel DC-DC converter optimal control method using digital control[J]. Electric Drive, 2018, 48(1): 32-35, 59.

收稿日期:2022-02-08

修改稿日期:2022-02-24