

一种采用全固态开关的高压双极性脉冲源

熊兰¹, 杨子康¹, 胡国辉², 谢子杰¹, 马龙¹, 何为¹

(重庆大学 输变电设备与系统安全及新技术国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆市计量质量检测研究院, 重庆 400020)

摘要:为满足高压脉冲电场灭菌实验的需要,提出一种结合经典 Marx 发生器与全固态开关器件的高压双极性方波脉冲源设计方案。选用全固态开关器件替代传统的火花间隙开关,以单极性 Marx 发生器为核心,实现能量压缩,通过全桥固态调制器可实现高压方波脉冲的双极性输出。详细分析了电路的结构、工作过程、控制策略和负载适应能力。以全固态 IGBT 为主开关器件,研制了脉冲源的高压主回路部分;设计了相应的控制电路和开关同步触发电路,通过光纤和隔离供电模块实现了信号传输和强弱电的隔离。相比于常规的双极性高压脉冲源,该方案具有更简洁的电路结构和良好的负载适应能力,实现了输出脉冲极性可控、前沿更陡,脉冲频率、脉宽、电压幅值可调等优点。实验结果表明,该脉冲源系统可以产生幅值范围 $-7 \sim 7$ kV、每秒脉冲数 $1 \sim 1\,000$ 、脉宽范围 $2 \sim 10$ μs 、极性可变的高压方波脉冲,为开展高压脉冲电场灭菌实验,寻找最佳灭菌电参数条件,提供了硬件支持。

关键词:高压脉冲发生器; 全固态; 双极性; 发生器; Marx; 调制器

DOI:10.15938/j.emc.2015.09.011

中图分类号: TM 8

文献标志码: A

文章编号: 1007-449X(2015)09-0073-08

One type of high voltage bipolar square pulser based on all-solid-state switch devices

XIONG Lan¹, YANG Zi-kang¹, HU Guo-hui², XIE Zi-jie¹, MA Long¹, HE Wei¹

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Academy of Metrology and Quality Inspection, Chongqing 400020, China)

Abstract: In order to meet the requirement of sterilization experiments under high-voltage pulsed electric field, a layout of high-voltage bipolar square pulser was proposed based on the combination of classical Marx generator and all-solid-state switching devices. The latter was chosen to take the place of spark gap switches and passive isolation elements. The core of high voltage pulser is the active charge-discharge Marx generator to realize the energy compression. In addition, the polarity alteration of output pulses was realized by a full bridge solid-state modulator. The pulser's structure, working process, control strategy and the load adaptability were illustrated. In fact, in Marx generator IGBT was taken as switch devices to form main circuit. In addition, the switch situation of synchronous trigger circuit was decided by the control circuit through the optical fiber, and signal transmission and electrical isolation were realized by the control circuit with isolated power supply modules. Compared with the conventional bipolar high voltage pulser, this circuit has better performance such as simple structure, good load adaptability, control ability of output pulse polarity and steep pulse front. Moreover, it is featured by the adjustability of output pulse's frequency and width and voltage amplitude. The test data shows that this pulser can generate bipolar pulse. The amplitude ranges from -7 to 7 kV, pulse per second is from 1 to $1\,000$, and pulse width is from 2 to 10 μs . Therefore, it is competent for further research on sterilization experiments under high-voltage pulsed electric field.

Keywords: high voltage pulser; all solid-state; bipolar; generator; Marx; modulator

收稿日期: 2013-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(51077139); 重庆市电器检测工程技术研究中心(cstc2011pt-gc70009)

作者简介: 熊 兰(1972—), 女, 博士, 教授, 研究方向为脉冲功率技术的水处理应用、电气设备在线智能化监测技术;

杨子康(1985—), 男, 硕士, 研究方向为工业水处理中脉冲功率技术的应用;

胡国辉(1975—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电子电气设备故障检测与分析、计算机测量控制;

谢子杰(1988—), 男, 硕士, 研究方向为工业水处理中脉冲功率技术的应用;

马 龙(1988—), 男, 硕士, 研究方向为工业水处理中脉冲功率技术的应用;

何 为(1956—), 男, 博士, 教授, 研究方向为医学电磁成像以及脉冲功率技术的应用。

通讯作者: 熊 兰

0 引言

脉冲功率技术已经被广泛应用于国防、高新技术和民用工业领域的研究中^[1-3],采用高压脉冲电场对液体中的细菌进行灭活和种群数量控制的非热灭菌技术由于杀菌时间短、效率高、温升小,对被处理液体化学成分和物理性状改变小等特点,在食品加工和工业水处理等领域研究中引起广泛关注,被认为是最具有市场应用前景、最有前途实现工业化应用的灭菌方法之一^[4-6]。

高压脉冲电场灭菌系统的核心是一台性能优良的高压脉冲源。Marx 发生器由于结构简单、扩展性好、对输入电压要求低等优点,在脉冲功率应用中被广泛使用。近年来,半导体开关组件大量用于 Marx 发生器的设计,以提高脉冲系统的可靠性、可控性和工作效率,获得更好的输出脉冲波形^[7-9]。目前,多数 Marx 发生器的设计倾向于采用固态开关器件取代传统开关(火花间隙),使用无源元件(电感扼流圈和电阻)实现充电和级间隔离。火花间隙开关多次放电导致的电极烧蚀使其需要经常进行维护。同时,无源隔离元件的引入使设计人员不得不在脉冲系统固有充电时间常数和工作效率之间进行权衡。电阻隔离型 Marx 发生器充电时间常数取决于隔离电阻与储能电容乘积的大小。使用电感隔离的 Marx 发生器可以视作一个级联的 boost 升压电路阵列,在负载和输出脉冲脉宽固定的情况下,它具有较快的充电速度和良好的隔离效果。而对于有输出电流上限的充电电源而言,增大输出脉冲宽度特别是在长脉冲应用时,将导致隔离电感的隔离能力下降,放电时刻充电电源的输出电流和开关器件电流很容易越限,导致系统停机甚至烧毁。因此,电感隔离的形式并不适用于要求输出脉冲宽度大范围变化的 Marx 发生器,并且电感隔离带来的 boost 效应总是使储能电容电压高于充电电源电压,不利于输出脉冲电压的稳定和精确控制。因此,可以认为,经典的 Marx 发生器往往是针对特定的负载和输出脉冲要求而设计的,当负载和输出脉冲参数偏离设计指标时,其工作性能将有所下降。

高压脉冲电源提供的高压脉冲按波形有指数衰减波和方波两种,极性可分为单极性和双极性脉冲^[10-13]。相比于指数衰减波,由于方波具有更高的能量利用效率,更长的高场强处理时间,因此被认为是较理想的处理波形;并且对处理腔施加双极性脉冲能有效避免单极性脉冲处理时的电极电化学腐蚀问题^[14-15]。因此,施加双极性方波脉冲被认为是较

好的处理手段。

为使全固态 Marx 发生器具有向负载提供双极性脉冲的能力,Tammo Heeren、Takahisa Ueno、Douyan Wang 等使用两台输出脉冲极性相反的 Marx 发生器交替向负载放电^[16],系统规模较之单极性 Marx 发生器增加了一倍,并要求充电电源具有正负极性输出能力。H. Canacsinh、L. M. Redondo、J. Fernando Silva 等将具有双极性脉冲输出能力的 Marx 发生器单元级联研制了输出脉冲幅值 5kV,脉宽 2.5 μs ,前沿 200ns 的双极性 Marx 发生器^[17];Tatsuro Sakamoto、Alireza Nami、Masahiro Akiyama 等按这种思路也研制了一台输出脉冲幅值 3kV,脉宽 0~10 μs 可调,前沿 100ns 的双极性 Marx 发生器^[18]。这种级联型双极性 Marx 发生器具有输出模式灵活多变,负载适应性好的特点,但电路结构复杂,难以扩展,限制了其通过进一步级联提高输出脉冲电压幅值的能力,并且过多的开关数量也降低了系统工作效率。

本文结合已有的双极性 Marx 发生器优点,加以改进,以绝缘栅双极型晶体管(IGBT)为主开关器件,研制了一台拟用于高压脉冲电场灭菌实验的具有较高重复频率和良好负载适应性的多参数可调快前沿全固态双极性高压方波脉冲源。

1 双极性方波脉冲源系统设计

1.1 双极性脉冲源基本原理

重复频率双极性方波脉冲源的核心是基于储能电容并联充电、串联放电工作原理的 Marx 发生器,要求达到的性能指标为:脉冲电压幅值 7 kV 以内连续可调;每秒输出脉冲数 1~1000 可调;脉冲前沿小于 200ns;脉宽 2~10 μs 可调;峰值输出电流 15A;方波脉冲顶降小于 15%。根据上述性能参数要求,提出双极性脉冲源的系统结构如图 1 所示。

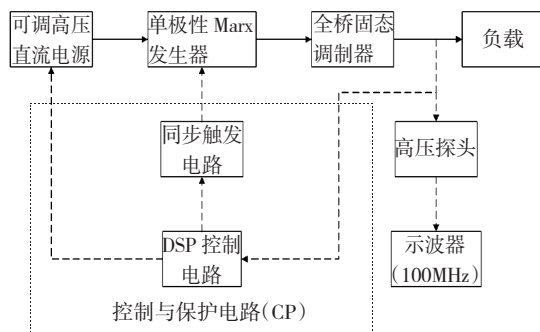


图 1 全固态双极性方波脉冲源结构框图

Fig. 1 Structure diagram of bipolar square pulser

系统包括高压直流电源、单极性 Marx 发生器、全桥固态调制器、控制与保护电路 CP 四部分。

1.2 双极性高压脉冲源的主回路设计

双极性高压脉冲源主回路原理图如图2所示,其中VDC为可调高压直流电源; R_i 为充电限流电阻。Marx电路各级使用IGBT和二极管替代传统的火花间隙开关和充电隔离元件(电阻、电感),结合CP电路实现可控放电。 T_{dn} 为放电开关; D_{1n} 为级间隔离二极管, D_{2n} 为级内隔离二极管;串联IGBT堆构成的高压开关组件A(+/-)、B(+/-)组成全桥固态调制器。Marx发生器经全桥固态调制器与负载Load相连。该电路通过Marx电路输出高压脉冲,通过全桥固态调制器控制输出脉冲极性,其工作原理可等效为图3电路。

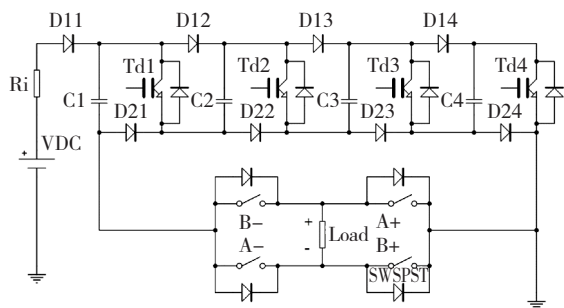


图2 双极性方波脉冲源高压主回路原理图

Fig. 2 Circuit of high voltage bipolar square pulser

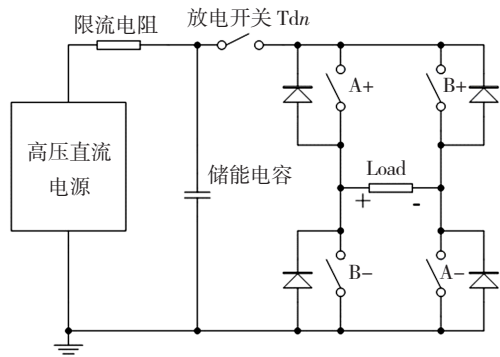


图3 双极性脉冲源系统等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit of bipolar square pulser

图2电路包含一个4级单极性Marx电路,当该电路级数为 n 时,忽略开关器件的导通压降,假定充电电源电压为 U 时,系统输出双极性脉冲幅值 $U_{Load} \approx \pm nU$ 。工作在双极性脉冲输出模式下,该电路有充电、正脉冲输出、负脉冲输出三种工作模态,其开关控制策略如图4。

在充电阶段, T_{dn} 、A(+/-)、B(+/-)关断,充电电源通过 D_{1n} 、 D_{2n} 和高压组件A、B的反并联二极管构成的回路向并联的各级储能电容充电,直至电容电压达到充电电压,系统进入充电保持阶段。

在正脉冲放电阶段,高压组件A(+/-)首先

开通,B(+/-)保持关断状态,预留出正极性脉冲放电通道等待Marx电路放电。接着, T_{dn} 开通,二极管 D_{1n} 、 D_{2n} 反向截止,Marx电路各级储能电容首尾串联向负载放电。在放电结束后 T_{dn} 首先关断,A(+/-)等待一定时间后再关断。

与正脉冲放电时不同的是,再次充电并进入负脉冲放电阶段时,B(+/-)首先开通,A(+/-)保持关断状态,预留出负极性脉冲放电通道等待Marx电路放电。接着, T_{dn} 开通,二极管 D_{1n} 、 D_{2n} 反向截止,Marx电路储能电容串联放电。在放电结束后 T_{dn} 首先关断,B(+/-)仍然等待一定时间后再关断。

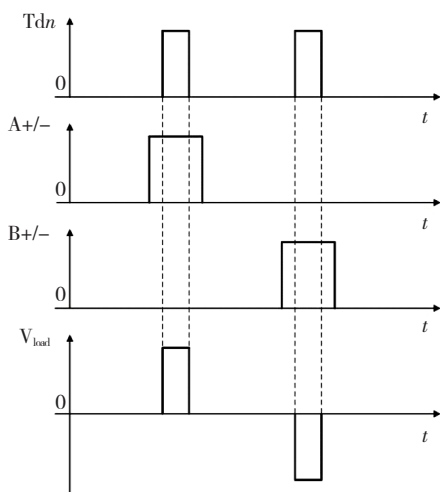


图4 双极性脉冲源控制策略及输出脉冲时序

Fig. 4 Control strategy and output pulse sequence of bipolar square pulser

这样的控制策略可以防止不同型号、不同用途的开关器件在放电时刻同时动作带来振荡,引发难以预测的电路损坏,并有利于提高负载适应性。在此种控制策略下,输出脉冲前沿几乎不受全桥固态调制器中大功率IGBT开通速度的影响,仍然能保持较快的上升沿。

在单极性Marx发生器基础上加入全桥固态调制器实现输出脉冲极性的改变,例如连续正脉冲输出、连续负脉冲输出、双极性脉冲输出和其他特定输出方式。

1.3 电路的负载适应性分析

由于该电源的对象负载是水,而且实验中使用的多种处理腔结构各不相同,因此负载可能含有电容性或电感性成份。脉冲源高压主回路的设计中有必要对负载适应性问题进行讨论,以脉冲源工作在正脉冲输出的状态为例。

对电感性负载,根据图4的控制策略,一次脉冲

输出结束后,开关 Tdn 关断后的一段时间内, A + / - 仍然保持开通状态,电感负载将通过 B + / - 的反并联二极管和 A + / - 续流。

对电容性负载,前一次脉冲输出后电容负载上将存储一定的能量,当 Tdn 关断放电结束后,系统立即进入充电状态,此时级内隔离二极管 D2n 也同时开通。电容负载将被 A + / - 和 D2n 构成的回路短接,泄放掉存储的能量。这种续流方案只有在负载上储存的能量非常高或者说储能电容的充电电流不足以使二极管 D2n 导通的情况下才会失效。同时,电容性负载上存储的能量完全释放后,负载两端的电压被钳位为 A + / - 和 D2n 回路的导通压降,即近似零电压,等待下一个脉冲输出。

最后,尽管负载上的脉冲极性在不断变化,但对于全桥固态调制器整体而言,Marx 电路输出的脉冲极性总是一定的,并且桥式电路在结构上具有对称性。因此,上述分析同样适用于负脉冲输出状态。

1.4 脉冲源主回路参数设计

1) Marx 发生器主回路参数设计

充电电源选择扬州格尔夫仕 1 kV 大功率可调直流电源。当输出脉冲电压幅值为 7 kV 时,电阻隔离的情况下并不能完全将储能电容充至电源电压,因此增加一级 Marx 单元进行电压补偿,Marx 电路级数设定为 8 级,开关器件选用英飞凌公司生产的 IGBT(SKW15N120)。选用的快速恢复二极管为英飞凌公司产 IDP09E120。

由于各级储能电容是串联放电,要求峰值输出电流为 $I_{Load} = 15 \text{ A}$,最大脉宽 $t_M = 10 \mu\text{s}$,脉冲顶降小于 15%,因此在 7 kV 最高电压输出下的电压顶降必须小于 $\Delta U_D = 1050 \text{ V}$,各级电容的容值可按 $\Delta U_D = \frac{I_{Load} \times t_M}{n} \times \frac{c}{n}$ 计算, n 为 Marx 电路级数,得到 $C \geq 1.34 \mu\text{F}$,

实际选取的是 $1.2 \mu\text{F}$,工作电压 2 kV 的聚丙烯薄膜电容,基本能满足实验要求。

2) 全桥固态调制器的参数设计

要求输出脉冲电压最大幅值为 7 kV,因此各桥臂高压开关组件的电压耐受能力应满足要求。为了降低固态调制器的复杂程度、减少器件数量,选择 IXYS 公司产的超高压 IGBT 单管 (IXEL40N400) 搭建 IGBT 串联高压组件。将三只 IXEL40N400 串联使用,使其能工作在 7 kV 的脉冲电压下,并为每只 IGBT 反并联一只二极管 DSP45-16A 作续流二极管。

根据图 4 给出的拓扑控制策略,在相应的输出脉冲极性下,需要动作的全桥固态调制器高压组件

A(+ / -) 或 B(+ / -) 总是先于 Marx 电路放电起始时刻导通,晚于 Marx 电路放电截止时刻关断,因此,并不要求高压组件直接在承受高电压的状态下开关。同时,根据图 4 控制策略,双极性脉冲源放电过程中,高压组件 A(+ / -) 和 B(+ / -) 总是一组关断另一组开通,关断的一组高压组件与负载并联,其上必然会承受 Marx 发生器输出高压脉冲冲击,当某一只 IGBT 上的瞬间电压过高导致击穿时,将引发串联 IGBT 出现连续击穿,导致全桥调制器击穿短路,危及整个系统的安全。因此,必须为其设计相应的冲击均压电路,保证关断状态的高压组件在承受输出脉冲冲击过程中各串联 IGBT 集电极间电压基本一致。

基于此种技术需求,依照脉冲测量用阻容并联分压器的设计思路对串联 IGBT 均压网络进行设计。为了实现对快前沿脉冲的较好响应,设计的均压网络采用在电阻分压基础上并联纵向补偿电容的方法实现。由于高压组件的尺寸 (长 12 cm、宽 4 cm) 和纵向串联的各 IGBT 间距 (3 cm) 较小,冲击均压电路的设计可以按集中参数进行计算,采用分立无源器件搭建。根据 IXEL40N400 参数表,关断状态下高压组件内单个 IGBT 的等效电阻随环境温度在 10 兆欧到 40 兆欧范围内变化,并且由于器件自身的差异,截断状态下的漏电流各不相同,导致其具体数值无法确定。因此,均压电阻的阻值要求远小于 IGBT 关断等效电阻,将各 IGBT 与均压电阻并联单元的电阻值确定为近似均压电阻值。考虑到均压网络功耗和抗干扰度,各 IGBT 并联均压电阻选择 10 k Ω 的棒状玻璃釉电阻。纵向补偿电容用以改善各均压电阻在脉冲上升沿和下降沿电压不均的现象,其容值要求至少为均压电阻对地杂散电容的 3 倍,考虑到电路板线路对地杂散电容约为 20pF,在不影响 Marx 电路输出功率的前提下,IGBT 并联纵向补偿电容选为 2nF 无感薄膜电容,并串接 10 Ω 的阻尼电阻。

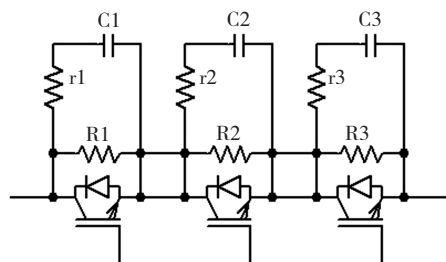


图 5 作为全桥固态调制器的高压组件电路

Fig. 5 Circuit of high voltage components as full bridge solid-state modulator

设计完成的全桥固态调制器单个桥臂高压组件的结构如图5所示,其中R、C、r分别为均压电阻、并联纵向补偿电容、阻尼电阻。同时,为了方便调试、减小系统体积和分布参数,在考虑电气绝缘的前提下 Marx 发生器和全桥固态调制器开关器件采用插装方式安装于母板上。

3) 隔离驱动措施

在 Marx 发生器储能电容串联放电过程中, Marx 发生器 IGBT 悬浮在一个很高的电位上,因此驱动供电电源、弱电控制单元与高压主回路间必须有良好的电气隔离。本文采用隔离电压 12 kV 的 DC-DC 电源模块为驱动电路供电,采用光纤传输控制信号,实现强弱电隔离。驱动芯片选用 IXYS 公司 IGBT 和 MOSFET 驱动专用芯片 IXDD609PI,满足驱动 1200 V/400 A 及以下功率等级 IGBT 的需要。

全桥固态调制器各 IGBT 同样采用光纤传输控制信号、隔离电源模块供电的有源驱动方式,驱动芯片选为 IXDD614,足以满足快速驱动 IXEL40N400 这类具有较大栅射极电容的大功率 IGBT 的需要。

4) 电路保护措施

本文设计的脉冲源是用于水处理实验,由于处理样液的不稳定,偶然的短路现象是不可避免的,为了保护 Marx 电路和全桥固态调制器内的 IGBT,必须为电路设计相应过电流保护电路。由于搭建全桥固态调制器的 IGBT (IXEL40N400) 通流能力远大于选用的 Marx 电路主开关 IGBT (SKW15N120),所以,过流保护的限值应按后者的通流能力设定。实际电路中触发过流保护的电流整定值依据 SKW15N120 的常态最大工作电流设定为 30 A。电流检测通过霍尔元件实现,获得的电流值在比较器中与整定值进行比较,比较值送往 DSP,一旦输出电流越限,即触发过流保护,DSP 输出控制信号闭锁,放电开关 T_{dn} 关断,阻止故障的进一步发展。过流保护工作原理如图6所示。

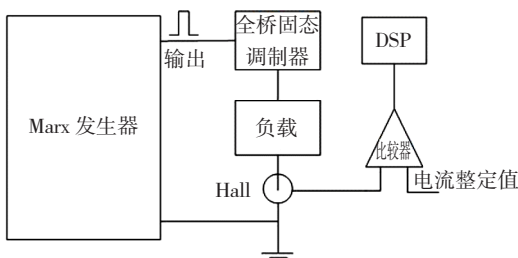


图6 过流保护原理图

Fig. 6 Principle diagram of over current protection

单极性 Marx 电路充电状态下 IGBT 的过压过流保护由充电电源自带的过压过流保护实现,放电状态 IGBT 的开关过电压尖峰吸收由并联的吸收电容实现。而设计的脉冲源电路中最昂贵也最重要的器件是搭建全桥固态调制器的数个高压 IGBT,其过压击穿是不可逆的损坏。因此,设计中全桥固态调制器 IGBT (IXEL40N400) 的反并联二极管选为 DSP45-16A,其反向击穿电压为 3.2 kV。当过电压发生时,反并联二极管将首先击穿短路,旁路掉 IGBT 并导致桥臂上下直通,触发过流保护,电路停止工作。

1.5 控制回路设计

本文选用 TI 公司产 TMS320F2812 型 DSP 芯片作为控制电路的核心,设定 TMS320F2812 中的事件管理器 EVA、EVB 中三个通用定时器工作在连续增计数模式,通过比较操作输出三路独立的开关控制信号,分别控制 Marx 发生器放电开关以及全桥固态调制器的两个对角桥臂协同工作,保证脉冲源正常工作^[19]。同时,为实现快前沿、高电压输出,要求 Marx 发生器中放电开关触发信号必须严格同步,控制。因此,将 DSP 产生的放电开关控制信号单独送入 EPM3256ATC144 型 CPLD 中进行处理,输出 8 路延时独立可调的放电开关控制信号,以满足实验需求,信号延时调节范围 ± 500 ns,调整步长 20 ns^[20]。

控制板和主回路间采用光纤通信方式,以减小信号传输延时,避免强电部分开关动作对控制信号的干扰。控制板产生的控制信号通过功率放大送入光纤发射器中,本文中光纤收发器选用安捷伦公司产 HFBR-1521/2521,其 2 m 内最大传输延迟小于 130 ns,基本能保证 Marx 发生器各开关管的同步触发要求。根据图4的控制策略,全桥固态调制器的高压组件的开通与关断时刻分别与 Marx 电路放电起始和截止时刻间留有足够的时间裕度。高压组件无需在高压下直接开关,仅要求其能在关断状态承受输出脉冲冲击,不会出现在高压下直接开关,各 IGBT 开关速度不一致导致分压不均而击穿的现象。因此,未对其控制信号进行各路独立的延时调整处理,仅采用光纤传送方式进行信号强弱电隔离并控制信号传输延迟。

每秒脉冲数 1 000pps,脉宽 3.5 μ s,双极性输出情况下,各 IGBT 的栅极驱动信号和控制信号的时序关系如图7所示。检测得到的控制信号和栅极驱动信号时序关系完全符合图4中设计的控制策略要求,并留有一定裕量。

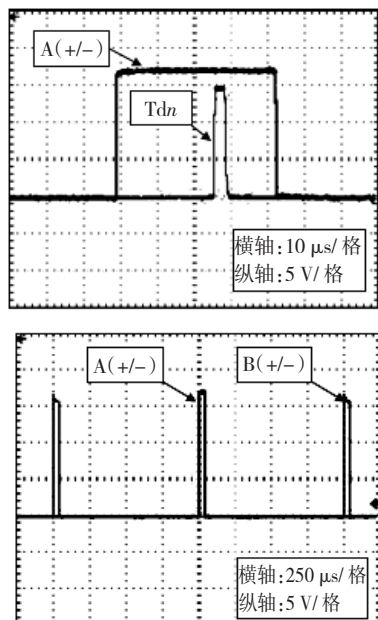


图 7 IGBT 控制信号和栅极驱动信号

Fig. 7 Control signal and the gate driving signal for IGBT

为了验证放电开关同步触发电路是否满足设计要求,对放电控制信号传输延迟和任意两只放电开关 Tdn 栅极触发信号的时间分散性进行检测,如图 8、图 9 所示。

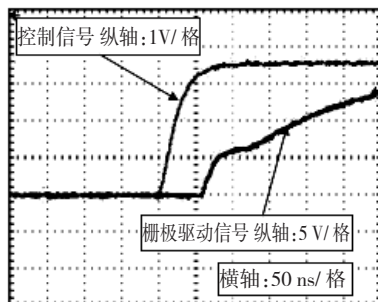


图 8 光纤传输系统信号延时

Fig. 8 Signal delay of optical fiber transmission system

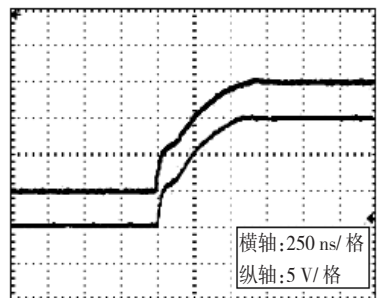


图 9 经延时调整后的任意两只放电开关栅极触发信号

Fig. 9 Trigger signal for any two discharge switches' gate after the delay adjustment

图 8 中可见光纤传输的延迟时间约为 110 ns,考虑到 IGBT 的实际开通时间仅为 40 ns,并且各路

光纤的传输延迟各不相同,因此控制电路的延时触发调节功能就显得很有必要,经延时调节后任意两只放电管的触发信号前沿相差在 15 ns 以内,较好的实现了放电开关管 Tdn 的同步触发。

2 双极性方波脉冲源性能测试

实验中双极性方波脉冲源包含的单极性 Marx 发生器为 8 级;负载为 500 Ω 线绕瓷管电阻,功率 2 000 W。采用固纬 LCR-8101G 型数字电桥测量发现负载电阻实际电感值为 53 μH,阻值 510 Ω,电容为 pF 量级,负载为阻感性。

电压测量采用泰克公司 TDS1012B-SC 型示波器,带宽 100 MHz;P6015A 型单端高压探头,带宽 70 MHz;电流测量采用安捷伦 1146A 型电流探棒。设定系统每秒输出脉冲数 1 000 pps,脉宽 3.5 μs。

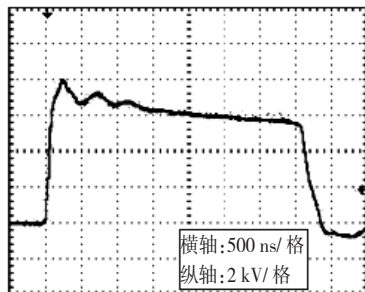


图 10 Marx 发生器输出电压波形 (7kV)

Fig. 10 Output voltage waveform of Marx generator (7kV)

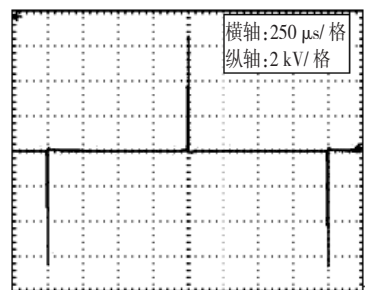


图 11 双极性脉冲电压整体波形

Fig. 11 Voltage waveform as series of bipolar pulses

不加全桥固态调制器时,设定输出电压为 7 kV 时,单独测试 Marx 发生器的输出电压波形如图 10 所示,可见输出脉冲前沿约 70 ns,脉冲前沿与后沿出现过冲与下冲,峰值电压可达 8 kV,并叠加有电压振荡。其根本原因是电路板导流铜带、负载连接线和负载阻抗不一致所致,经实际计算脉冲源电路板导流铜带特征阻抗为 30 Ω,连接负载的单芯铜缆特征阻抗为 75 Ω,脉冲前沿高频分量将在放电回路各阻抗突变点处发生反射引起电压振荡,输出线与负载阻抗失配导致方波脉冲出现过冲和下冲。

在加装全桥固态调制器后,仍然带 $500\ \Omega$ 线绕电阻负载测试,负载特性与单极性测试一致。设定输出电压 $6\ \text{kV}$,工作在双极性状态。采用平均值测量,得到图 11 所示的双极性输出脉冲整体波形。图 12 所示为双极性工况下正、负极性脉冲的电压电流波形。图 13 为脉冲电压波形前沿。

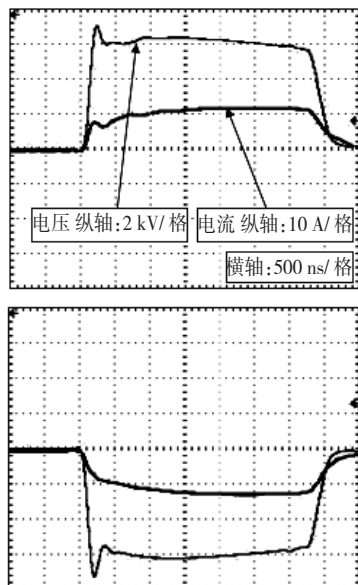


图 12 双极性脉冲电压与电流波形

Fig. 12 Bipolar pulse voltage and current waveforms

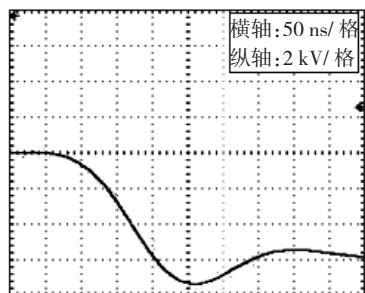


图 13 脉冲电压波形前沿

Fig. 13 Front edge of voltage pulse waveform

从图 12 可以看到,由于全桥固态调制器 IGBT 均压电路在双极性脉冲源向负载放电时等效为与负载并联,因此负载上的电压波形得到明显改善,但脉冲前沿也因此减缓为 $150\ \text{ns}$ 。同时,由于负载电感的影响,脉冲前端仍然出现了一个电压尖峰,在 Marx 方波脉冲输出截止后出现了明显的电感续流放电过程,负载电流相位滞后于电压相位。

除此之外波形无明显畸变、毛刺。输出电压幅值为 $6\ 000\ \text{V}$,电流 $12\ \text{A}$,与带 $500\ \Omega$ 负载时的理论计算值相吻合。验证了该双极性脉冲源拓扑理论设计的正确性。

3 结 论

1) 本文给出了一种以 IGBT 为主开关器件,基于单极性 Marx 发生器和全桥固态调制器的双极性高压脉冲源设计方案,可输出电压幅值最高 $7\ \text{kV}$ 、每秒最大脉冲数 $1\ 000$ 、前沿 $150\ \text{ns}$ 、最大脉宽 $10\ \mu\text{s}$ 的双极性高压方波脉冲,并且重复频率、脉宽、电压幅值可调。该电源的研制为开展高压脉冲电场灭菌实验提供了硬件支持。

2) 该方案电路结构简洁、脉冲前沿陡、重复频率较高。同时,设计了以 DSP 和 CPLD 为核心的控制电路和多路开关同步触发电路,实现了良好的控制效果,可以输出满足极性要求的连续脉冲串。

3) 受 IGBT 驱动供电模块隔离电压的限制,Marx 电路的级数、最大脉冲数和输出电压幅值存在上限,为了在进一步提高输出脉冲电压的同时保持电路结构的简洁,应当设计更高隔离电压等级的专用驱动供电电源,并且换装工作电压更高的 IGBT 和充电电源。同时,在试验基础上探究出能更好地实现负载匹配的方案。

参 考 文 献:

- [1] AKIYAMA H, SAKUGAWA T, NAMIHIRA T, et al. Industrial applications of pulsed power technology[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(5): 1051 - 1064.
- [2] MANKOWSKI J, KRISTIANSEN M. A review of short pulse generator technology [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(1): 102 - 108.
- [3] 朱丽楠, 郜冶, 马军, 等. 高压脉冲电场中填充活性氧化铝催化降解水中有机污染物 [J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 461 - 466.
ZHU Linan, GAO Ye, MA Jun, et al. Catalytic degradation of organic pollutants by packing activated alumina in high voltage pulsed d-ischarge electric field [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 461 - 466.
- [4] 魏新劳, 李家辉, 延二宝. 脉冲电场灭菌机理分析及细菌失活模型的研究 [J]. 电机与控制学报, 2011, 15(1): 7 - 12.
WEI Xinlao, LI Jiahui, YAN Erbao. Analyses of pulsed electric field sterilization mechanism and bacterial inactivation model [J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(1): 7 - 12.
- [5] KEMPES M, GAUDREAU M, HAWKEY T, et al. Scaleup of PEF systems for food and waste streams [C] // 2007 16th IEEE International Pulsed Power Conference, June 17 - 22, 2007, Albuquerque, USA. 2007: 1064 - 1067.
- [6] SCHOENBACH K H. Bacterial decontamination of liquids with pulsed electric fields [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(5): 637 - 645.
- [7] GHASEMI Z, MACGREGOR S, ANDERSON J, et al. Development of an integrated solid-state generator for light inactivation of

- food-related pathogenic bacteria[J]. *Meas Sci Technol*, 2003, 14(6): N26 - N32.
- [8] GAUDREAU M P J, CASEY J A, KEMPKE M A, et al. Solid-state modulators for plasma immersion ion implantation applications [J]. *Vac Sci Technol B Microelectron Process Phenom*, 1999, 17(2): 888 - 894.
- [9] RICHTER-SAND R J, ADLER R J, FINCH R, et al. Marx-stacked IGBT modulators for high voltage, high power applications [C]//in Proc 25th Int. Power Modulator Symp, June 30-July 3, 2002, 2002;390 - 393.
- [10] 王仁丽, 廖敏夫, 孔繁东, 等. 间歇式 HPEF 的高压脉冲电源及其杀菌实验[J]. *高电压技术*, 2007, 33(2): 82 - 85.
WANG Renli, LIAO Minfu, KONG Fandong, et al. Research on sterilization of pulsed generator in HPEF fixed chamber[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(2): 82 - 85.
- [11] 方兴东, 关志成, 王黎明, 等. 高压脉冲放电在水处理中应用及发展[J]. *高电压技术*, 2000, 26(1): 29 - 31.
FANG Xingdong, GUAN Zhicheng, WANG Liming, et al. Research on treatment of waste water by high voltage pulse discharge [J]. *High Voltage Engineering*, 2000, 26(1): 29 - 31.
- [12] ZIMMERMAN U, PILWAT G, RIEMANN F. Dielectric breakdown of cell membranes [J]. *Biophys*, 1974, 14(11): 881 - 899.
- [13] ZIMMERMAN U, BECKERS F, COSTER H G L. The effect of pressure on the electrical breakdown in the membranes of *Valonia utricu-laris* [J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1977, 464: 399 - 416.
- [14] 魏新劳, 李家辉, 延二宝. 脉冲电场作用下细菌细胞膜跨膜电压分析[J]. *电机与控制学报*, 2010, 14(5): 85 - 90.
WEI Xinlao, LI Jiahui, YAN Erbao. Analysis for transmembrane voltage on bacterial membrane in pulsed electric field[J]. *Electric Machines and Control*, 2010, 14(5): 85 - 90.
- [15] 张若兵, 陈杰, 肖健夫, 等. 高压脉冲电场设备及其在食品非热处理中的应用[J]. *高电压技术*, 2011, 37(3): 777 - 786.
ZHANG Ruobing, CHEN Jie, XIAO Jianfu, et al. Pulsed electric fields system and its application in non-thermal food processing[J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(3): 777 - 786.
- [16] HEEREN T, UENO Y, WANG Douyan, et al. Novel dual marx generator for microplasma applications [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, 33(4): 1205 - 1209.
- [17] CANACINH H, REDONDO L M, SILVA J F, et al. Marx-type solid-state bipolar mod-ulator topologies: performance comparison [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, 40(10): 2603 - 2610.
- [18] SAKAMOTO T, NAMI A, AKIYAMA M, et al. A repetitive solid state marx-type pulsed power generator using multistage switch-capacitor cells [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, 40(10): 2316 - 2321.
- [19] 王宝国, 宗鸣, 王凤翔. 复杂可编程逻辑器件 (CPLD) 在 DSP 交流电机控制系统中的应用 [J]. *电机与控制学报*, 2001, 5(1): 40 - 43.
WANG Baoguo, ZONG Ming, WANG Fengxiang. Application of CPLD to DSP AC motor control systems [J]. *Electric Machines and Control*, 2001, 5(1): 40 - 43.
- [20] 盖建新, 马怀俭, 李延智, 等. 多通道动平衡测试系统算法 [J]. *电机与控制学报*, 2006, 10(3): 321 - 328.
GAI Jianxin, MA Huaijian, LI Yanzhi, et al. Multi-channel dynamic balance test system algorithm [J]. *Electric Machines and Control*, 2006, 10(3): 321 - 328.

(编辑:张诗阁)