

基于分数比可饱和脉冲变压器的 全固态脉冲驱动源初步研究*

陈 绒¹, 杨建华^{1,2}, 程新兵^{1,2}, 钱宝良¹

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073;

2. 国防科技大学 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230031)

摘 要: 设计了一台基于分数比可饱和脉冲变压器的全固态脉冲驱动源, 其核心部件为分数比可饱和脉冲变压器, 用来实现固态磁开关、脉冲调制、电压升压等功能, 再借助 Marx 技术、磁开关技术和反谐振网络调制技术建立全固态脉冲驱动源, 初步实验结果表明当直流电源提供 100 V 的充电电压时, 该全固态脉冲驱动源可输出 14.4 kV 左右的准方波信号, 脉宽约 194 ns, 验证了该技术方案实现输出百纳秒准方波信号的可行性, 为建立百 MW 长脉冲信号输出的全固态脉冲驱动源模块提供了设计思路。

关键词: 全固态脉冲驱动源; 分数比可饱和脉冲变压器; Marx 技术; 磁开关技术; 反谐振网络调制技术

中图分类号: TN782

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190327

Preliminary study on all-solid state long pulse generator based on fractional-turn ratio saturable pulse transformer

Chen Rong¹, Yang Jianhua^{1,2}, Cheng Xinbing^{1,2}, Qian Baoliang¹

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230031, China)

Abstract: This paper presents the design of an all-solid state pulse generator based on a fractional-turn ratio saturable pulse transformer which, as the key component, takes the roles of magnetic switch, pulse forming device, voltage boosting device, etc. Preliminary experimental results show that a quasi-square pulse with the amplitude of 14.4 kV and the pulse width of 194 ns are obtained while the DC voltage source supply is 100 V. Hence, it is feasible to apply this technology to construct a generator outputting pulses with the pulse width of several hundred nanoseconds. This study can provide a guidance to construct a MW level solid state pulse generator module.

Key words: all-solid state pulse generator; fractional-turn ratio saturable pulse transformer; Marx generator; magnetic compression; anti-resonance network

实现脉冲功率装置的固态化有助于提高系统重复频率、平均功率和使用寿命,因而成为了近年来脉冲功率技术的一个研究热点。目前国内外已经有较多的关于不同应用领域的固态脉冲发生器的研究报告^[1-5]。目前,在中等峰值功率(百 MW 级)、高平均功率应用领域,固态化的脉冲功率系统得到了较好的发展。如 2005 年, Gaudreau M P J 等利用 Marx 发生器和串联的 IGBT 电路建立了一台输出电压 20 kV、电流 300 A, 输出脉宽 5 μ s, 重复频率达 1 kHz 的固态脉冲发生器^[1]。但是,对于 GW 级高功率脉冲发生器,受固态开关工作电压、功率容量和功率压缩比,以及固态脉冲形成等方面影响,实现全固态存在着较大的技术困难。国际上,俄罗斯和美国的研究最具代表性。俄罗斯电物理研究所 S 系列全固态脉冲发生器性能优越,其输出脉冲宽度数十 ns,其中 S-5N 峰值功率最高,接近 2 GW^[6];美国海军实验室研制了基于磁开关技术的全固态 Marx 发生器,以 12 级 Marx 发生器、磁开关以及 PFL 为主体,在负载上输出电压 200 kV, 电流 4.5 kA, 脉宽 300 ns, 峰值功率约 0.9 GW, 实现了 10 Hz 重复频率下超过千万次的运行寿命^[7]。

* 收稿日期: 2019-09-01; 修订日期: 2019-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51707198, 51641707, 51477177)

作者简介: 陈 绒(1993—), 女, 博士研究生, 主要从事脉冲功率技术研究; chenrong0101@163.com。

通信作者: 程新兵(1983—), 男, 博士, 副研究员, 从事脉冲功率技术研究; 120chch@163.com。

国内,西北核技术研究所引进 S 系列全固态脉冲发生器技术基础上,研制出胡杨 700 驱动源,经初步调试在 $150\ \Omega$ 电阻负载上单脉冲输出指标达到 $660\ \text{kV}$, $4.4\ \text{kA}$, 脉宽约 $70\ \text{ns}$, 峰值功率达 $3.5\ \text{GW}$ ^[8]; 中国工程物理研究院采用半导体开关研制了 $500\ \text{kV}$ 全固态 Marx 发生器,目前已实现 $500\ \text{kV}$ 脉冲输出,在 $50\ \text{Hz}$ 的重复频率下实现数十个脉冲的猝发输出,输出脉冲宽度 $3\sim 10\ \mu\text{s}$, 峰值功率约 $0.5\ \text{GW}$ ^[9]; 国防科技大学高景明等利用大功率晶闸管组件、磁脉冲压缩网络、双线型低阻抗脉冲形成网络和感应电压叠加器等一系列脉冲功率前沿技术研制了一种高功率长脉冲驱动源,在水电阻负载上获得的实验结果是输出功率 $2.1\ \text{GW}$, 脉宽约 $170\ \text{ns}$ ^[10]。

本文提出利用分数比可饱和脉冲变压器 (Fractional-turn Ratio Saturable Pulse Transformer, FRSPT)^[11] 结合磁开关技术和反谐振网络技术^[12] 实现准方波信号输出,验证了该技术方案的可行性,为建立全固态百 MW 长脉冲驱动源模块提供了设计经验,进而为利用模块化串并联技术实现 GW 级全固态脉冲驱动源奠定了基础。

1 全固态脉冲驱动源模块整体方案设计

在整体方案设计中,为了避免大量单管半导体开关串并联,解决系统稳定性差、开关同步要求高等问题,本文采用了分数比可饱和脉冲变压器 (FRSPT)^[11] 实现升压变压器与磁开关的双重功能,同时解决普通绕组形式的可饱和脉冲变压器 (Saturable Pulse Transformer, SPT)^[13] 不能兼顾高升压比和低次级饱和电感的矛盾。FRSPT 的应用在开关同步、系统抗干扰能力与长时间运行能力等方面具有相当大的优势。

为进一步提升电压,采用了 FRSPT 作为控制开关的 Marx 发生器。由于开关闭合由磁芯强制饱和完成,各级 Marx 电容器精确同步放电,不需要外加触发控制电路,极大地简化了系统电路结构,实现了升压变压器、磁开关及 Marx 发生器的紧凑集成。

一般来说,由于 FRSPT 次级饱和电感的存在,前文所述的 Marx 发生器输出脉冲前沿几百 ns,脉宽几 μs ^[14],要实现输出百 ns 长脉冲准方波信号,需要对其输出的信号进行进一步压缩整形,高功率磁开关结合反谐振网络技术^[12] 作为系统的压缩整形模块将百 ns 准方波信号传输给负载。系统整体设计框图如图 1 所示,主要由初级储能系统、FRSPT, Marx 发生器、磁开关、反谐振式脉冲形成网络、负载以及相应的控制系统、复位系统等构成。

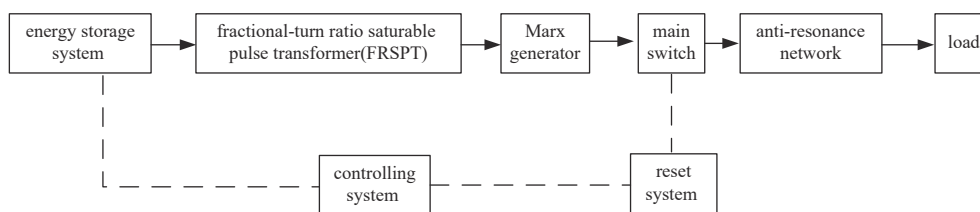


Fig. 1 System frame of the all-solid long pulse generator based on FRSPT

图 1 全固态长脉冲驱动源系统框图

考虑到现有基于 FRSPT 与 Marx 发生器的微秒脉冲发生器能实现前沿几百 ns 的脉冲信号^[14],以及反谐振网络整形脉冲时对回路电感的要求^[12],系统方案将输出准方波脉冲宽度设计为 $200\ \text{ns}$,以满足高功率微波产生器件对驱动源的要求。根据图 1 的整体设计框图,对全固态长脉冲驱动源电路设计,其设计示意图如图 2 所示,其中 C_0 为初级储能电容,FRSPT 的每组次级子绕组分别与 Marx 发生器各级电容器相连,由此构成全固态紧凑化 Marx 发生器;该 Marx 发生器采用高压硅堆作为其隔离元件,通过隔离电感 L_1 为主电容 C_1 充电,磁开关 MS 为主开关,当主电容 C_1 上的电压使 MS 达到伏秒积后,MS 闭合,主电容 C_1 通过脉冲形成模块在负载上形成准方波信号。值得一提的是,控制初级储能电容的开关 S_2 为晶闸管开关,利用其电流过零关断的特性,结合具体的电路连接形式,流过 FRSPT 初级绕组的电流在储能电容 C_0 的充放电过程中相反,于是可以做到对 FRSPT 磁芯的自动复位,避免额外的复位电路设计。

电路仿真中,设计 FRSPT 由 5 磁芯绕制,Marx 发生器为 4 级。当初级储能电容 C_0 充电 $200\ \text{V}$ 时,得到的仿真结果如图 3 所示。磁开关 MS 闭合后,主开关 C_1 通过反谐振式脉冲形成网络向负载放电,最终在 $100\ \Omega$ 匹配负载上得到脉宽约 $200\ \text{ns}$ 的准方波脉冲,基本符合设计思路,为建立全固态百 MW 长脉冲驱动源模块提供了设计基础。

2 主要部件设计

2.1 初级储能系统

初级储能采用开关电源 DC 对脉冲电容器 C_f 充电,利用大电容 (C_f) 对小电容 (C_0) 充电的原理,脉冲电容器

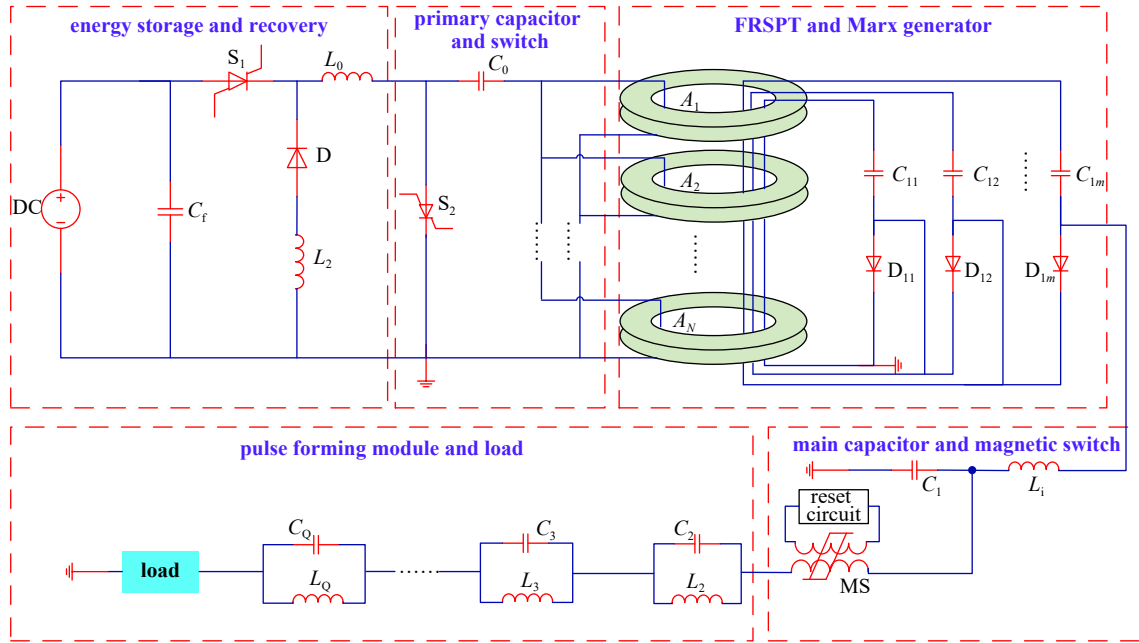


Fig. 2 Schematic diagram of the all-solid long pulse generator based on FRSPT

图 2 全固态长脉冲驱动源设计示意图

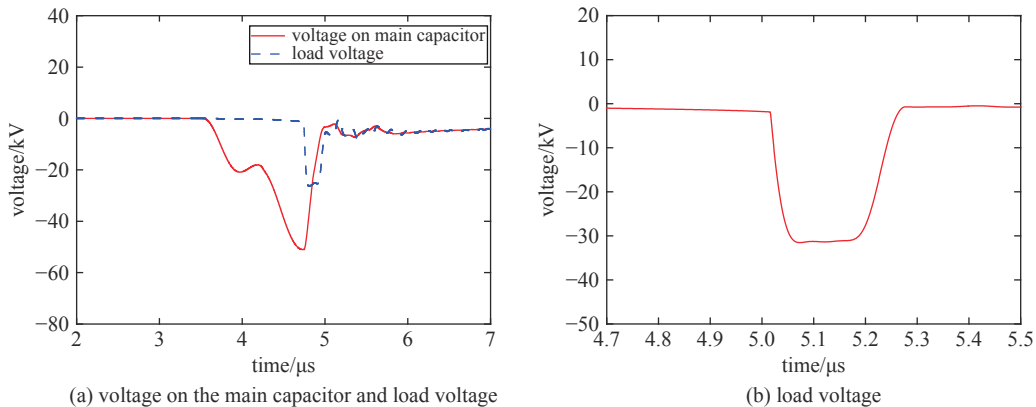


Fig. 3 Simulation results of the all-solid long pulse generator

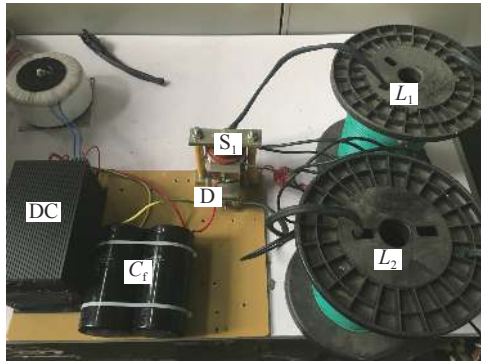
图 3 全固态长脉冲驱动源电路仿真结果

C_f 对脉冲变压器初级储能电容 C_0 充电,以提高变压器初级储能电容的工作电压。如图 4(a)所示,直流电源部分采用两个开关电源串联,能实现 $0\sim 500\text{ V}$ 直流电压连续可调,能量补充电容 C_f 由两个容量为 6.8 mF 的电解电容串联而成, L_1 与 L_2 均为线绕式电感,且 $L_1=L_2=103\text{ }\mu\text{H}$ 。晶闸管开关 S_1 为控制能量补充电容 C_f 向原边电容 C_0 充电的控制开关,大功率二极管 D 与电感 L_2 构成了能量回收回路,以提高本单元的能量效率。同时,由于能量补充电容 C_f 向原边电容 C_0 谐振充电时与原边电容向 FRSPT 放电时流过变压器初级绕组的电流方向相反,因此,本装置可实现对变压器磁芯的自动复位。

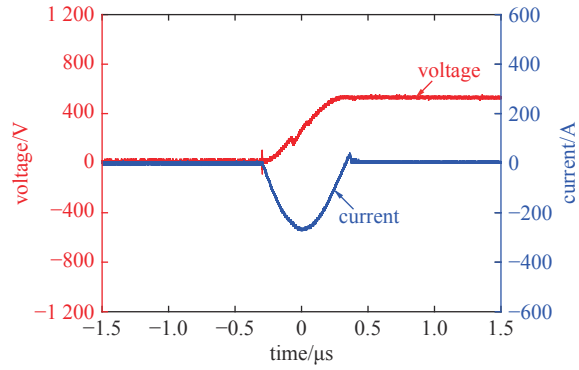
根据图 4(b)的测试结果,控制开关 S_1 触发后经过约 $590\text{ }\mu\text{s}$ 原边电容充电至最高电压,因此,只需要设置 S_1 与原边控制开关 S_2 的触发时间差大于 $590\text{ }\mu\text{s}$ 即可在原边电容电压最大时控制其向 FRSPT 初级绕组放电。为了充分利用能量,最终设置 S_0 相对 S_2 的触发时延为 $600\text{ }\mu\text{s}$ 。

2.2 基于 FRSPT 的 Marx 发生器

研究表明,FRSPT 具有输出多路高压脉冲的能力,在固态 Marx 发生器中具有重要的应用潜力^[4]。本文设计了基于 FRSPT 作为控制开关的紧凑化 Marx 发生器,利用 FRSPT 次级的多路绕组在磁芯非饱和态和饱和态之间的切换,同步控制 Marx 发生器的并联充电和串联放电过程,实现高变比变压器、磁开关和 Marx 发生器的紧凑集成。同时,将传统 Marx 发生器中的隔离电阻或隔离电感元件使用高压硅堆替代,基本消除了由隔离电阻或电感引起的预脉冲效应,且进一步提高了系统能量利用效率。



(a) photo of the primary energy storage system



(b) test results of the primary energy storage system

Fig. 4 Photo and test results of the primary energy storage system

图 4 初级储能系统实物图及测试结果

图 5 为本文设计的基于 FRSPT 的全固态紧凑型 Marx 发生器电路模型, 其由 4 个完全相同的 Marx 级电容和 4 个单体 50 kV/200 A 的圆柱形高压硅堆构成, 各级电容器电容量为 6 nF; 控制电容器放电的开关由 FRSPT 次级绕组构成, 其本质是磁开关, 由于设计 Marx 发生器为 4 级, 因此 FRSPT 次级绕制了 4 组独立的次级绕组分别与 4 个电容器相连。

当初级储能电容充电 200 V 时, 仿真得到各级电容器两端 (图 5 中点 $A_1, B_1, D_1, E_1, A_2, B_2, D_2$ 和 E_2) 电压以及主电容 C_1 上的电压如图 6 所示。Marx 发生器升压状况良好, 各级电容器充电时间约 3.5 μs , 最高充电电压为 14.7 kV, 各级电容器低压端输出电压分别为 10.6 kV, 20.9 kV, 32.3 kV 以及 43.4 kV, 于是, 该 Marx 发生器的升压比约为 2.95。FRSPT 次级饱和电感 (百 μH 量级) 以及磁芯饱和时间 (百纳秒量级) 的存在使得其升压比低于 Marx 发生器级数。磁芯饱和后, Marx 发生器各级电容串联向主电容放电, 可等效为 C-L-C 回路; 若设计开关在 C_1 充电峰值饱和, 则可获得最大的能量效率。

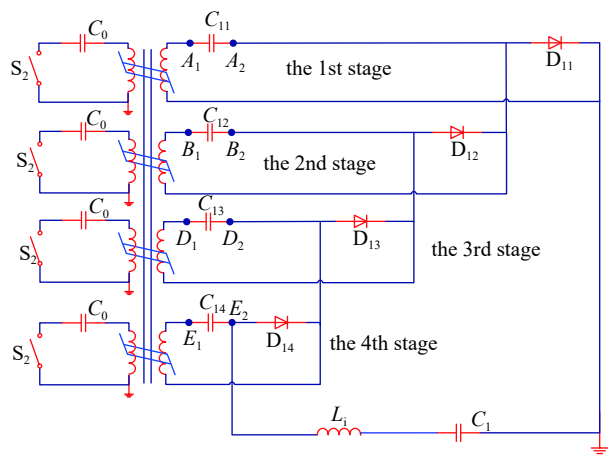
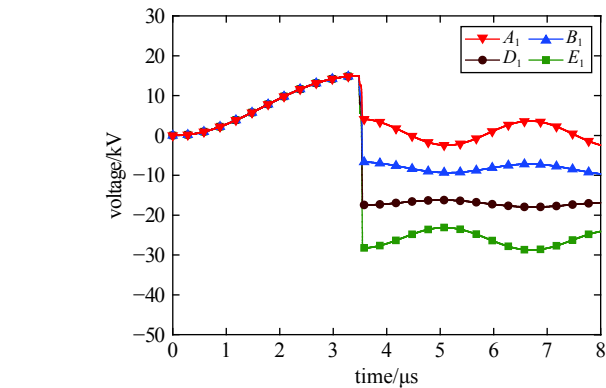
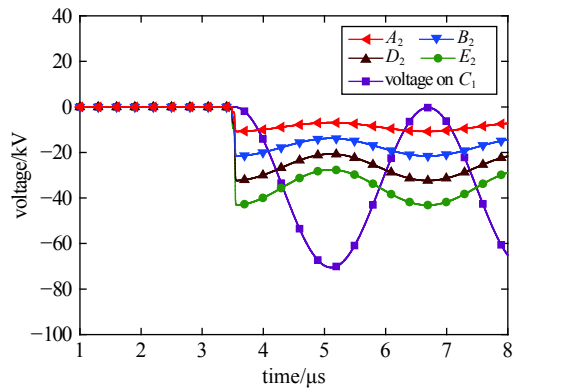


Fig. 5 Circuit model of the Marx generator based on FRSPT

图 5 基于 FRSPT 的 Marx 发生器电路模型



(a) voltage on the point A_1, B_1, D_1 and E_1



(b) voltage on the main capacitor and the point A_2, B_2, D_2 and E_2

Fig. 6 Simulation results of the Marx generator based on FRSPT

图 6 基于 FRSPT 的 Marx 发生器仿真测试结果

2.3 主开关与脉冲形成模块

在本方案中, 主开关采用磁开关, 脉冲形成模块采用反谐振式脉冲形成网络^[12], 其等效电路模型如图 7 所示。其中电容器 C_0 与电感 L_0 为等效的 Marx 发生器放电电路, FRSPT 次级绕组等效为开关 S ; 电阻 R_1 与 R_2 为回路电阻, 电感 L_i 为隔离电感, Marx 发生器通过它对主电容 C_1 进行谐振充电; MS 为主开关, 控制主电容 C_1 向脉冲形成网络的放电过程。在实际的实验中, 隔离电感 L_i 的分布电容将导致主电容 C_1 充电过程中的不均匀性, 因此在主开

关的设计中, 需要考虑分布电容 C_p 的影响。

电容器 C_1, C_2, C_3 与电感 L_1, L_2, L_3 构成三节反谐振式脉冲形成网络, 在负载上形成准方波脉冲。三节反谐振式脉冲形成网络参数的选择可以由下式决定^[12]

$$\begin{cases} C_1 = 0.435 \frac{\tau}{\rho}, & L_1 = 0.220 1 \rho \tau \\ C_2 = 0.450 \frac{\tau}{\rho}, & L_2 = 0.012 1 \rho \tau \\ C_3 = 0.250 \frac{\tau}{\rho}, & L_3 = 0.083 8 \rho \tau \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ 为输出准方波的脉冲宽度; ρ 为脉冲形成模块的特性阻抗。根据前文方案, 输出脉宽 200 ns, 阻抗 100 Ω , 根据式 (1) 可得反谐振网络各组件参数如下

$$\begin{cases} C_1 = 870 \text{ pF}, & L_1 = 4.04 \text{ } \mu\text{H} \\ C_2 = 900 \text{ pF}, & L_2 = 0.242 \text{ } \mu\text{H} \\ C_3 = 500 \text{ pF}, & L_3 = 1.676 \text{ } \mu\text{H} \end{cases} \quad (2)$$

电路仿真中, 当储能电容充电 200 V 时, 测量主电容 C_1 与负载 R 两端的电压 (图 7 中 A, B 两点电压) 如图 8 所示, 分布电容的存在将影响主电容 C_1 的充电过程, 使得充电过程中存在不均匀性, 进而产生次生震荡, 这一特性会改变主电容上的充电输出波形, 使得充电幅值下降, 更重要的是, 将直接影响磁开关的设计。

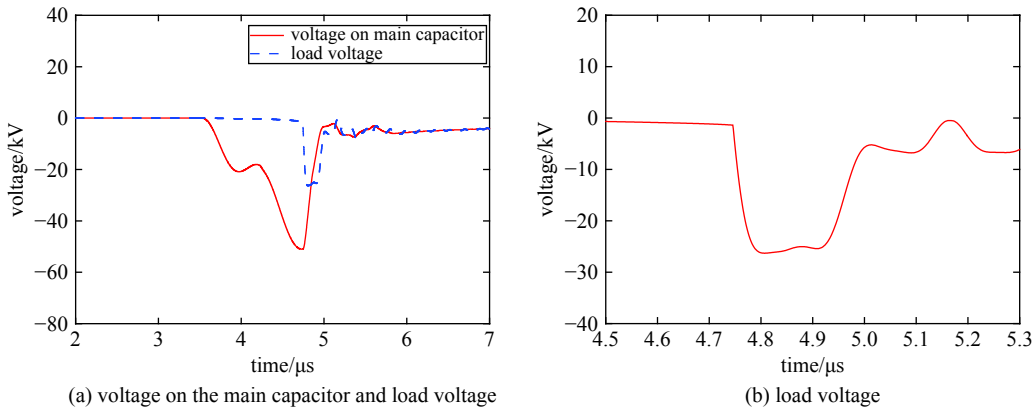


Fig. 8 Simulation results of the all-solid long pulse generator involving the distributed capacitance

图 8 考虑分布电容的全固态长脉冲驱动源电路仿真结果

3 全系统初步实验结果

基于上述关键部件的设计研制了基于 FRSP 的全固态长脉冲驱动源, 在直流充电电压 100 V 的条件下, 实验测量了主电容 C_1 上的充电波形以及负载输出波形如图 9 所示。可见驱动源脉冲形成效果良好, 脉冲宽度约为 194 ns, 电阻负载 (阻值约 100 Ω) 的电压幅值约 14.4 kV。主开关能够基本实现控制主电容放电的功能, 全系统初步实验结果验证了方案的合理性。但由于充电电压过低, FRSP 与主开关的磁芯都未达到最佳工作状态。

4 结 论

本文提出了基于 FRSP 的全固态长脉冲驱动源方案, 对初级储能系统、基于 FRSP 的全固态 Marx 发生器、主开关与脉冲形成模块等主要部件进行了设计研究, 进而对全系统进行了初步验证实验, 在固态电阻上输出电压幅值约 14.4 kV, 脉宽 194 ns, 为基于 FRSP 的全固态长脉冲驱动源进一步实验奠定了基础; 未来将进行驱动源高压实验, 并开展模块化技术研究

致 谢 感谢国防科学技术大学前沿交叉学科学院技术员周相、朱敏等在平台的搭建以及实验数据采集和问题排查方面给予的帮助。

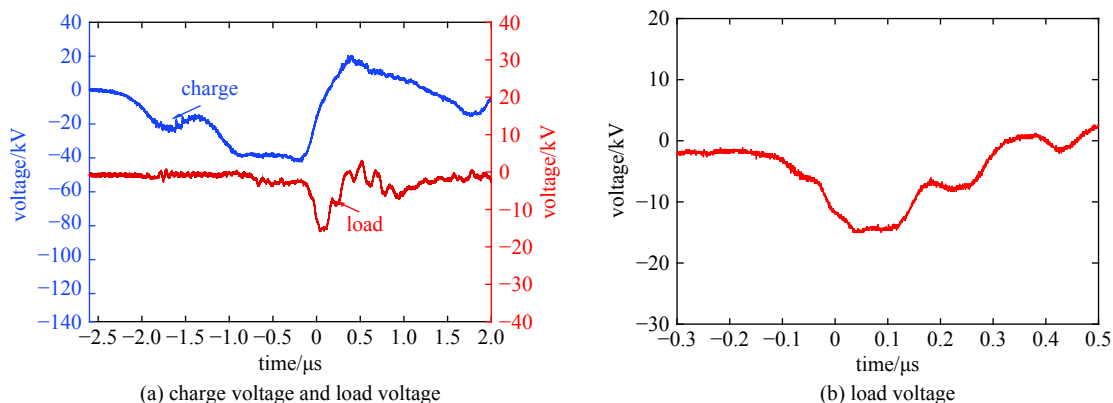


Fig. 9 Preliminary experimental results of the all-solid long pulse generator

图9 全固态长脉冲驱动源电路初步实验结果

参考文献:

- [1] Gaudreau M P J, Casey J, Mulvaney J M, et al. Compact, solid-state pulse modulators for high power microwave applications[C]//The Fifth Conference on Ultra-Wideband Short-Pulse Electromagnetics 2002: 485-491.
- [2] Kempkes M A, Casey J A, Gaudreau M P J, et al. Solid-state modulators for commercial pulsed power systems[C]//IEEE Conference Record of the Twenty-Fifth International Power Modulator Symposium, 2002 and 2002 High-Voltage Workshop Power Modulator Symposium, 2002 and 2002 High-Voltage Workshop. 2002.
- [3] Baek J W, Yoo D W, Rim G H, et al. Solid state Marx generator using series-connected IGBTs[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2005, 33(4): 1198-1204.
- [4] Zhang Y, Liu J. A new kind of solid-state Marx generator based on transformer type magnetic switches[J]. *Laser and Particle Beams*, 2013, 31(2): 239-248.
- [5] Wang D, Qiu J, Liu K. All-solid-state repetitive pulsed-power generator using IGBT and magnetic compression switches[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2010, 38(10): 2633-2638.
- [6] Kotov Y A, Mesyats G B, Rukin S N, et al. A novel nanosecond semiconductor opening switch for megavolt repetitive pulsed power technology: Exp[C]//IEEE International Pulsed Power Conference. 1993.
- [7] Hegeler F, McGeoch M, Sethian J, et al. A durable gigawatt class solid state pulsed power system[J]. *IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, 18(4): 1205-1213.
- [8] 苏建仓, 刘国治, 丁臻捷, 等. 基于SOS的脉冲功率源技术新进展[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(8): 1195-1200. (Su Jiancang, Liu Guozhi, Ding Zhenjie, et al. Experiment and applications of SOS-based pulsed power[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(8): 1195-1200)
- [9] 李洪涛, 王传伟, 王凌云, 等. 500 kV全固态Marx发生器[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(4): 917-920. (Li Hongtao, Wang Chuanwei, Wang Lingyun, et al. 500 kV all-solid-state Marx generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(4): 917-920)
- [10] 高景明, 李嵩, 杨汉武, 等. 基于磁开关技术的长脉冲驱动源初步研究[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 065003. (Gao Jingming, Li Song, Yang Hanwu, et al. Preliminary researches on high power long pulse generator based on magnetic switches[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 065003)
- [11] Chen Rong, Yang Jianhua, Cheng Xinbing, et al. Research of a fractional-turn ratio saturable pulse transformer and its application in a microsecond-range pulse modulator[J]. *Plasma Science and Technology*, 2017, 19(6): 99-105.
- [12] Pan Z L, Yang J H, Cheng X B. Research of the anti-resonance pulse forming network and its application in the Marx generator[J]. *Laser & Particle Beams*, 2016, 34(4): 675-686.
- [13] 张东东, 周媛, 李文峰, 等. 全固态高重复频率磁脉冲压缩发生器[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(4): 889-892. (Zhang Dongdong, Zhou Yuan, Li Wenfeng, et al. All-solid-state high-repetition-rate magnetic pulse generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(4): 889-892)
- [14] Chen Rong, Yang Jianhua, Cheng Xinbing, et al. Developing a solid-state quasi-square Marx generator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89: 064707.