



·脉冲功率技术·

## 多路 Marx 并联高压脉冲电源研究\*

饶俊峰, 洪凌锋, 郭龙跃, 李 孜, 姜 松

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

**摘 要:** 脉冲功率技术在工业和生物医学领域有着广泛的应用, 很多应用场合要求输出数百安培的高压脉冲。固态 Marx 发生器虽已研究多年, 但是被广泛采用直插封装的 IGBT 和 MOSFET 功率半导体开关管的额定电流通常都低于 100 A, 无法满足低阻抗负载的应用需求。为提高输出脉冲电流幅值, 提出两种多路 Marx 发生器并联的脉冲电源的拓扑结构, 第一种方案采用多路 Marx 发生器直接并联, 第二种是共用一组充电开关管的多路 Marx 发生器并联。由 FPGA 提供充放电控制信号, 采用串芯磁环隔离驱动方案实现带负压偏置的同步驱动, 主电路选用开通速度快、通流能力强的 IGBT 为主开关的半桥式固态方波 Marx 电路。实验结果表明, 6 路 16 级 Marx 直接并联的脉冲发生器能输出重频 100 Hz 高压方波脉冲幅值可达 10 kV, 在 30  $\Omega$  负载侧输出峰值电流可达 300 A, 上升时间 230 ns。共用充电开关管的 6 路 4 级 Marx 并联发生器在 5  $\Omega$  电阻负载上的输出电流峰值可达 300 A, 最大输出电流可达 460 A, 上升时间 272 ns。表明多路 Marx 发生器并联可以有效地减小系统内阻, 提高系统带载能力; 改进后的并联方案实现大电流脉冲输出的同时, 所采用的开关管数量减小近一半, 提高了系统的抗干扰能力的同时, 降低了脉冲电源的成本; 且增加级间并联导线可进一步改善均流效果。

**关键词:** 脉冲电源; Marx 发生器并联; 大电流; 方波脉冲

中图分类号: TM832

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.190472

## Investigation of high voltage pulse generators with Marx generators in parallel

Rao Junfeng, Hong Lingfeng, Guo Longyue, Li Zi, Jiang Song

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Pulsed power technology has been widely used in industrial and biomedical applications. In many cases, high-voltage pulses with current amplitudes up to hundreds of amperes are required. Although solid-state Marx generators have been studied for a couple of years, the rated current of power semiconductor switches such as IGBT and MOSFET in Direct Insertion Packaging (DIP) is usually much lower than 100 A, which cannot meet the high-current requirements for low-impedance load. Therefore, two topologies of the multiple Marx generators in parallel are proposed to increase the amplitudes of output current. In the first structure, multiple Marx generators are connected in parallel directly. In the second structure, multiple Marx generators sharing a series of charging switches are connected in parallel. An FPGA provides two control signals for charging and discharging. Using many transformers with their primary winding in series, synchronous driving signals with negative bias voltage are realized. And the main circuit adopts the solid-state rectangular Marx circuit based on half-bridge units. Power IGBTs which has fast opening speed and high current capacity are utilized as the main switches. The experimental results show that the pulse generator with six 16-stage Marx generators directly connected in parallel can output high-voltage rectangular pulses with voltage amplitude up to 10 kV and peak current up to 300 A through a 30  $\Omega$  resistive load at a repetition frequency of 100 Hz. The peak output current of six 4-stage Marx generators in parallel with shared charging switches can reach 300 A with a rising time of 230 ns, and the maximum output current can reach 460 A with a rising time of 272 ns through a 5  $\Omega$  resistive load. The results show that the parallel connection of multiple Marx generators can effectively reduce the internal resistance of the system and improve the current capacity of the system. Moreover, multiple Marx generators in parallel with shared charging switches not only output high-current pulses, but also halve the number of switches while the EMC is also improved. The current balancing can be further improved by inserting the parallel connection between stages.

**Key words:** pulse generator; Marx generators in parallel; high current; rectangular pulse

\* 收稿日期: 2019-12-17; 修订日期: 2020-02-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51707122); 上海市青年科技英才扬帆计划项目(19YF1435000)

作者简介: 饶俊峰(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事全固态纳秒高压脉冲发生器、大功率直流充电技术和低温等离子体应用等研究工作; [raojunfeng1985@163.com](mailto:raojunfeng1985@163.com)。

随着脉冲功率技术的发展, 半导体开关被广泛应用于脉冲功率发生器中, 它可以有效缩小发生器体积, 提高重复频率, 增加使用寿命, 增加系统的可控性。Marx 发生器的核心思想是对多个电容进行并联充电, 然后通过开关技术将其串联起来, 对负载直接放电以获得高电压脉冲输出。采用半导体开关的固态 Marx 发生器<sup>[1-4]</sup> 因其脉宽、频率和脉冲幅值都连续可调, 且能量利用率更高, 因此被广泛用于臭氧产生<sup>[5]</sup>、材料改性<sup>[6-9]</sup>、生物细胞处理<sup>[10]</sup>、废水处理<sup>[11]</sup>、低温等离子体的产生<sup>[12]</sup> 等应用上。近年来, 固态 Marx 发生器在水中放电<sup>[13]</sup>、肿瘤消融<sup>[14]</sup> 等领域有了更多的应用, 而这些应用的负载都表现出低阻性, 例如, 在肿瘤消融应用中, 需要用百安培的大电流脉冲以杀死肿瘤细胞。这对固态 Marx 发生器的带载能力提出了更高的要求。受到 IGBT 和 MOSFET 等主流功率半导体开关通流能力的限制, 固态 Marx 发生器难以长时间输出高压大电流脉冲, 故本文提出了两种多路 Marx 发生器并联的脉冲发生器结构以提高其输出电流幅值。本文首先介绍了两种 Marx 发生器并联结构的工作原理, 以及所采用的驱动和控制方案, 然后通过实验验证了其可行性, 并对实验结果进行分析, 最后总结了这两种方案的优缺点。

## 1 多路 Marx 发生器并联高压脉冲电源

本文提出了两种 Marx 发生器并联的高压脉冲电源结构, 第一种是将多路 Marx 发生器的主电路直接并联, 并共用同一个直流电源进行充电的方案, 第二种则是在第一种结构的基础上进一步改进, 将多路 Marx 发生器共用同一组充电开关管和直流电源, 减少了将近一半的功率半导体开关。本文中第一种结构采用 Infineon 公司的 IGW60T120 作为主开关, 其额定电压为 1.2 kV、额定电流为 60 A。第二种结构采用 IXYS 公司的 IXYH50N120C3D1 作为主开关, 其额定电压为 1 200 V、额定电流为 50 A。二极管均采用 IXYS 公司耐压为 1.2 kV 的 DSEP12-12A, 每级主电容均为耐压 1 kV、容量为 400 nF 的多层陶瓷电容, 直流充电源  $V_{DC}$  可提供高达 1 kV 的可调直流电压。

### 1.1 多路 Marx 发生器直接并联方案

图 1 是多路 Marx 发生器直接并联方案的电路拓扑, 只是简单的将多路基于半桥结构的方波 Marx 电路在首末端进行了并联而已。当控制充电过程的开关管  $S_1, S_{c11} \sim S_{cmm}$  开通时, 每一级储能电容经二极管  $D_{11} \sim D_{nm}$  并联充电, 电容的充电时间常数为  $\tau = R_c C$  ( $R_c$  为线路等效电阻)。在程序设定的两次放电间隔内  $S_1, S_{c11} \sim S_{cmm}$  开关管均导通, 以给  $C_{11} \sim C_{nm}$  电容提供足够长的充电时间。忽略二极管的压降, 则每一级储能电容上的电压与直流电源电压相等。当充电开关管  $S_1, S_{c11} \sim S_{cmm}$  关断后, 控制放电过程的开关管  $S_{d11} \sim S_{dmm}$  开通, 每路 Marx 发生器中的储能电容  $C$  串联、同时多路 Marx 发生器并联向负载放电, 从而输出高压大电流脉冲。对于阻性负载, 其输出电流为

$$I_o = \frac{nV_{DC}}{R_{load}} \quad (1)$$

式中:  $I_o$  为负载上的总输出电流;  $n$  为每一路 Marx 包含的级数;  $V_{DC}$  为直流输入;  $R_{load}$  为负载阻值。

由于采用了多路 Marx 发生器并联的拓扑, 减小了每路 Marx 电路的输出电流峰值, 提高了整个系统的输出电流能力。在放电过程中, 由于充电管  $S_1$  处于关断状态, 可以预防某些故障情况下直流充电源直接被负载短路造成的影响。

### 1.2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联方案

在图 1 的方案中, 每路 Marx 发生器彼此独立, 都有自己的充电和放电回路, 只是使用的开关管数量非常多, 增加了系统成本和控制的复杂性。在实际使用中, 充电电流比放电电流小得多, 因此, 对于图 1 中的 Marx 发生器, 充电管只需采用较小额定电流、与放电管同等耐压的半导体开关即可。本文在多路 Marx 发生器直接并联结构的基础上对其进行了改进, 提出了一种新的拓扑结构, 其主电路结构如图 2 所示, 整个发生器有  $m$  路, 每一路包含  $n$  级 Marx 发生器。当 Marx 发生器并联时, 用二极管  $D_{c11} \sim D_{cmm}$  替代图 1 中的充电管  $S_{c11} \sim S_{cmm}$ , 并用一组总耐压足够高的半导体开关  $S_{b1} \sim S_{bi}$  来控制电容的充电过程。每个 Marx 发生器的所有电容都由开关  $S_{b1} \sim S_{bi}$  控制充电。在充电阶段, 每路 Marx 发生器的电容器  $C_{11} \sim C_{1m}$  通过二极管  $D_{11} \sim D_{1m}$  和开关  $S_1$  充电, 其他电容器  $C_{21} \sim C_{nm}$  通过二

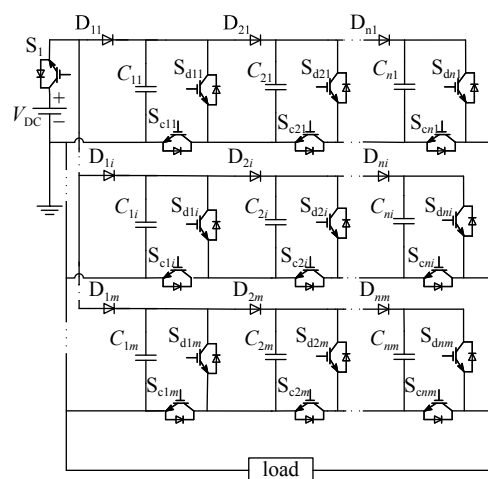


Fig. 1 Power circuit of many Marx generators connected in parallel directly

图 1 多路 Marx 发生器直接并联主电路

极管  $D_{11} \sim D_{nm}$ ;  $D_{c21} \sim D_{cnm}$  和开关  $S_{b1} \sim S_{bn}$  充电。当  $S_{d11} \sim S_{dnm}$  开通时, 储能电容向负载串联放电, 从而输出高压脉冲。改进后的结构不仅可以使每一路 Marx 发生器正常充电, 而且大大的减少了半导体开关的使用, 节约了成本, 缩小了发生器体积, 同时提高了系统的可靠性。

### 1.3 驱动电路

不同的半导体开关具有不同的工作特性, 为了获得快速上升沿的高压脉冲, 并降低半导体的开通损耗, 要求驱动电路具有很快的驱动速度和数安培的驱动电流, 而且在固态 Marx 高压脉冲电源中, 由于每级 IGBT 的发射极电位不同, 驱动电路的设计与常见的电力电子电路有较大差异, 因此需采取同步隔离的快速驱动方式。通常, 光纤与脉冲变压器都可用于隔离驱动信号, 但是如果用光纤进行隔离, 则需要更多的控制信号与光纤数量, 以及给每级光纤接收器的隔离供电电路, 不仅增大了系统损耗和系统复杂性, 更降低了系统的电磁兼容能力, 而且增加了整个系统的成本。采用串心磁环同步驱动的磁隔离方案<sup>[15-17]</sup>具有隔离电压高、成本低、同步性好、无需隔离电源等特点, 满足了驱动系统的要求。故本文的驱动信号采用应用成熟的串心磁环的同步磁隔离驱动方案<sup>[15-17]</sup>, 该方案利用同轴线作为驱动变压器的原边绕组。原边采用 1 匝带屏蔽层的高压同轴线, 外层接地起屏蔽干扰作用, 内导体用作驱动信号传输; 副边为多匝绝缘导线绕制而成, 可以有效地驱动半导体开关。这种驱动方式同时把驱动信号和功率都通过在串心磁环原边传递到副边, 解决了传统驱动芯片需要给副边每级驱动单独隔离供电的问题。同时提供了负压偏置保证 IGBT 可靠关断。该方案的设计要求和特点在文献<sup>[15-17]</sup>中已经有详细阐述, 本文不再赘述。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 多路 Marx 发生器直接并联方案

本文设计了 6 路 16 级 Marx 并联的脉冲发生器, 并对设计的脉冲发生器进行了实验。使用采样带宽 1 GHz, 采样频率为 10 GHz 的数字示波器 DPO5104(Tektronix, USA) 和高压探头 P6015A (Tektronix, USA) 来记录数据。

图 3 是空载时的输出电压波形, 其最大峰值电压可达 10 kV, 且上升沿、下降沿时间均低于 100 ns, 实验中输出电压和脉宽等参数均连续可调。图 4 是重频 100 Hz 时的电压波形。

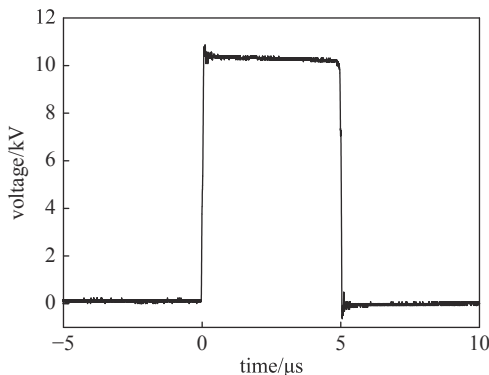


Fig. 3 Voltage waveform with open circuit

图 3 空载输出电压波形

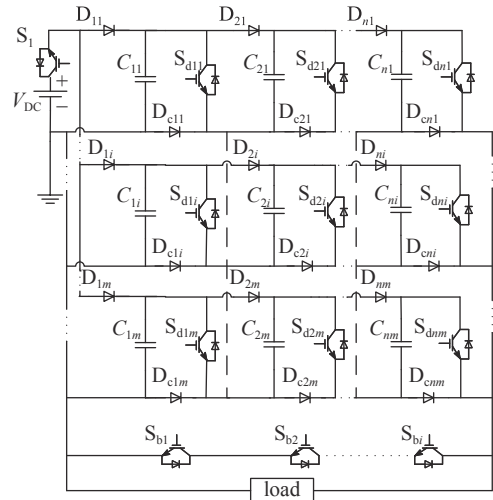


Fig. 2 Power circuit of many Marx generators in parallel sharing charging switches

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

图 2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联主电路

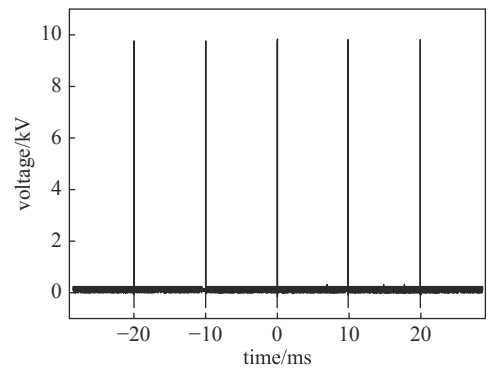


Fig. 4 Voltage waveform at the frequency of 100 Hz

图 4 重复频率 100 Hz 时的电压波形

图 5 是在 30 Ω 的低感性电阻负载上的输出电流仿真波形, 采用的是 PSPICE 仿真软件。由于本文中采用贴片陶瓷电容, 6 路 16 级 Marx 并联电路的等效电容容量仅为 150 nF, 导致在低阻抗负载下顶降非常明显, 实际中只需根据放电参数选取合适容量的大电容即可减小顶降。图 6 是 6 路 Marx 发生器直接并联方案在 30 Ω 的电阻负载上的输出电流, 其电流幅值达到 300 A, 上升时间 230 ns, 与仿真结果基本一致。图 7 是每一支路的实际输出电流, 图中每一支路输出电流 50 A 左右, 可以看到每路的电流波形基本一致, 但是由于半导体开关特性及驱动的差异性, 加

上每路的杂散电感很难保持严格一致,从而导致每一路输出电流略微有些不均。这个问题可以通过级级并联<sup>[18]</sup>的方式来改善,让并联 Marx 具有电流自平衡能力同时还可以起到保护开关管的作用。

## 2.2 共用充电开关管的多路 Marx 发生器并联方案

为了验证共用充电管的 Marx 并联方案的可行性,本文按照图 2 所示电路设计了 6 路 4 级 Marx 并联电路并进行系统测试。对比图 1 的方案,本方案仅用 4 个串联的充电管即可控制发生器的充电,而 6 路 4 级 Marx 直接并联的方案所需的充电管数量为 24 个,可见需用的开关管数量明显减少。图 8 是共用充电开关管的 6 路 Marx 发生器并联方案在 5  $\Omega$  电阻负载上的输出电流波形,同样采用的贴片陶瓷电容,6 路 4 级 Marx 并联电路的等效电容量 600 nF,当充电电压为 443 V,输出总电流可达 300 A,上升时间 318 ns。图 9 为每一路 Marx 的输出电流波形,电流幅值都在 50 A 左右,同时也可以看出电流上升沿差异比较明显。在本实验中,为了测试均流效果,故意设计每路 Marx 放电回路的电感量不同,越靠近输入端,其放电回路的总电感越小,将 6 路 Marx 按照离输入端从近到远分别命名为 1~6 路,6 路 Marx 电路输出电流波形的上升时间(10%~90%)最大为 492 ns,最小为 273 ns,相差达 219 ns。为了改善这种电流不均的现象,采用级级并联的方式进一步开展实验<sup>[18]</sup>,具体并联方式如图 2 中的虚线所示,不同 Marx 之间的同样级数增加单线并联。如图 10 所示是级级并联的方式测得的各路 Marx 的电流波形,可以看到电流波形电流上升时间最大为 425 ns,最小为 268 ns,相差仅 157 ns,比没有级级并联方案有了明显改善。同时电流分配不均问题也得到了明显的改善,尤其是 1,2 两路在 1  $\mu$ s 时电流幅值分别从 38.6 A 和 40.5 A 上升到了 43.2 A 和 44.8 A,并且发现电流在顶降期间也得到了有所改变,级级并联后顶降期间电流幅值仍然保持一致。从整体波形

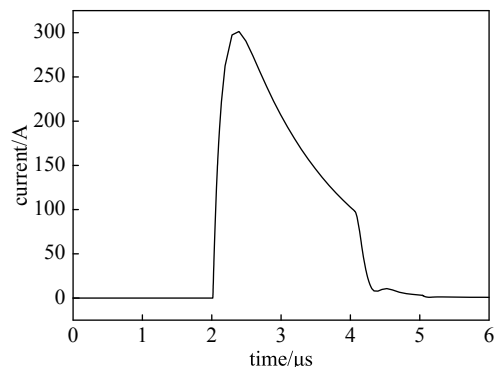


Fig. 5 Simulating waveform of total current through resistive load  
图 5 阻性负载上总电流仿真波形

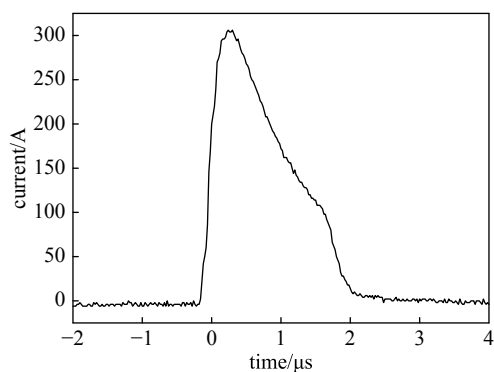


Fig. 6 Waveform of total current through resistive load  
(directly paralleled)

图 6 阻性负载上总电流

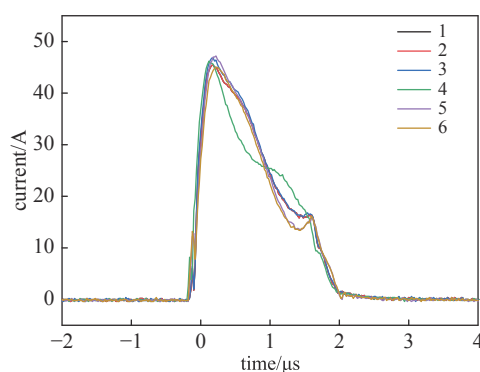


Fig. 7 Waveforms of current in various branches  
(directly paralleled)

图 7 不同 Marx 支路的输出电流波形

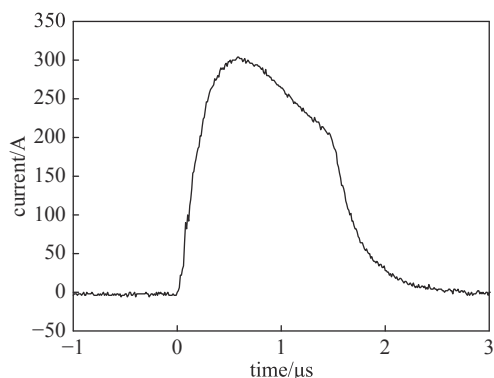


Fig. 8 Waveform of total current through resistive load  
(sharing charging switches)

图 8 阻性负载上总电流

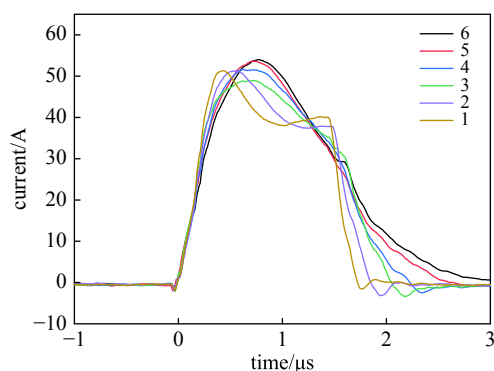


Fig. 9 Waveforms of current in various branches  
(sharing charging switches)

图 9 不同 Marx 支路的输出电流波形

发现,改善后的每路电流波形保持一样的上升下降趋势,若减小每路 Marx 电路放电回路电感的差异,可进一步改善每路电流的一致性。若进一步提高充电电压至 678 V,该电路在相同条件下最大输出电流可达 460 A,上升时间 272 ns,如图 11 所示。结果表明,只用一组串联的开关管可以在控制多路 Marx 的充电,提高了充电效率的同时起到了截尾的作用,减少了开关管的数量同时也提高了系统的稳定性。

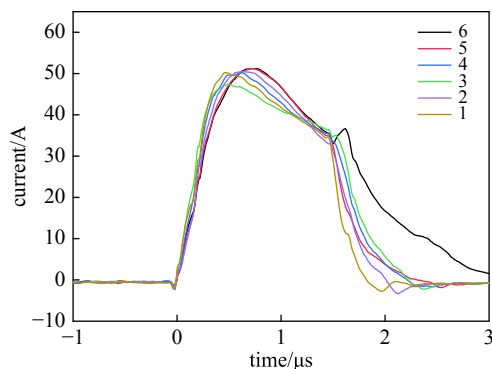


Fig. 10 Current waveforms in different branches with stage-stage parallel connection

图 10 级级并联后每一路 Marx 输出电流

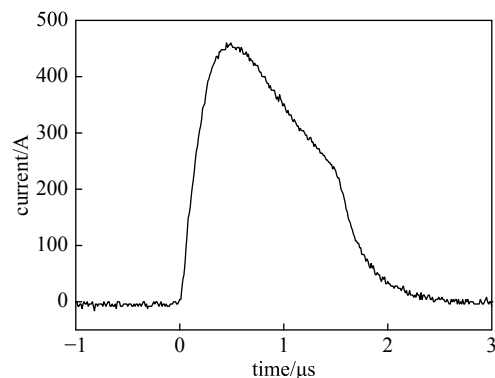


Fig. 11 Waveform of maximum current through resistive load

图 11 相同条件下负载输出最大电流

### 2.3 多路 Marx 并联发生器的优势

图 12 是 3 路 8 级 Marx 并联与单路 8 级 Marx 在不同负载下的输出电压。实验时直流输入都为 300 V,负载电阻取 12, 16, 20, 24  $\Omega$ , 分别用这两种发生器测得负载上的输出电压幅值,结果如图 12 所示。其中黑色是 3 路 Marx 并联的输出电压,红色是单路 Marx 输出电压。为了防止每级内部短路,在 Marx 发生器中串联了低阻抗的电阻,单路 8 级 Marx 发生器的内阻为 16  $\Omega$ 。直流输入为 300 V 时,该系统理论输出 2.4 kV,但由于系统内阻的分压,导致在负载上的输出电压幅值降低。从图中可以看出,两种发生器随负载阻值的增加其输出电压幅值也相应增加。单路 Marx 发生器在 16  $\Omega$  的负载上输出电压为 1.1 kV,系统内阻分得近一半电压。而 3 路 Marx 发生器在 16  $\Omega$  的负载上输出电压为 1.78 kV,表明此时的系统内阻由于并联减少了一半以上。由此可得出,在相同输入电压,相同低阻抗负载下,3 路 Marx 并联发生器的输出电压幅值比单路 Marx 发生器的更高,由此可见,多路 Marx 并联不仅提高系统的输出电流幅值,还可以减小系统的等效内阻,进一步提高系统的带载能力。

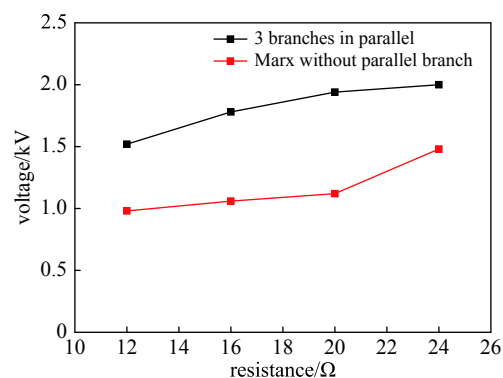


Fig. 12 Voltage amplitudes over different resistive loads by Marx generators with 3 branches in parallel or single 8-stage Marx generator

图 12 3 路 Marx 并联与单路 Marx 在不同负载上的输出电压

## 3 结论

本文设计并测试了两种多路并联的 Marx 发生器,可产生重频的高压大电流快脉冲。采用的串心磁环同步驱动方案,既保证了同步驱动,还提供了负电压偏置,优化了系统的电磁兼容。实验表明多路 Marx 并联方案可以减少系统的内阻与杂散电感,提高了脉冲输出的上升沿及系统带载能力。在多路 Marx 发生器直接并联结构上继续改进,只用一组串联的半导体开关可以控制多路 Marx 的充电,可提高系统的充电效率,大幅减少使用的开关管数量,控制信号和驱动电路也更简单,降低了发生器的成本,使系统更加稳定可靠。同时在此基础上加入了级级并联<sup>[18]</sup>的方式可进一步平衡各路 Marx 的输出电流,缩短电流脉冲的上升时间,提高系统的可靠性。

### 参考文献:

- [1] Redondo L M, Silva J F. Repetitive high-voltage solid-state Marx modulator design for various load conditions[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2009, 37(8): 1632-1637.
- [2] Liu Kefu, Qiu Jian, Wu Yifan, et al. An all solid-state pulsed power generator based on Marx generator[C]//Proc of 16<sup>th</sup> IEEE Int Pulsed Power Conf. 2007: 720-723.

- [3] 刘克富. 固态Marx发生器研究进展[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1781-1787. (Liu Kefu. Research progress in solid-state Marx generators[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1781-1787)
- [4] 江伟华. 基于固态器件的高重频脉冲功率技术[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(3): 561-564. (Jiang Weihua. High repetition-rate pulsed power generation using solid-state switches[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(3): 561-564)
- [5] Wei Linsheng, Yuan D K, Zhang Y F, et al. Experimental and theoretical study of ozone generation in pulsed positive dielectric barrier discharge[J]. Vacuum, 2014, 104(2): 61-64.
- [6] 李黎, 彭明洋, 腾云, 等. 大气压重频纳秒脉冲放电对尼龙纤维的表面改性[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 753-761. (Li Li, Peng Mingyang, Teng Yun, et al. Surface modification of nylon fiber by atmospheric pressure and repeated nanosecond pulse discharge[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 753-761)
- [7] Lowke J J. Plasma predictions: past, present and future[J]. Plasma Sources Science & Technology, 2013, 22(2): 023002.
- [8] Katja F, Hartmut S, Thomas V W, et al. High rate etching of polymers by means of an atmospheric pressure plasma jet[J]. Plasma Processes & Polymers, 2011, 8(1): 51-58.
- [9] 章程, 邵涛, 于洋, 等. 纳秒脉冲介电阻挡放电特性及其聚合物材料表面改性[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 31-37. (Zhang Cheng, Shao Tao, Yu Yang, et al. Nanosecond pulse dielectric barrier discharge characteristics and surface modification of polymer materials[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 31-37)
- [10] Krishnaswamy P, Kuthi A, Vernier P T, et al. Compact subnanosecond pulse generator using avalanche transistors for cell electroperturbation studies[J]. IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(4): 873-877.
- [11] Smulders E H W M, Van Heeh B E J M, Van Passen S S V B. Pulsed power corona discharges for air pollution control[J]. IEEE Trans Plasma Science, 1998, 26(5): 1476-1484.
- [12] 曹鹤飞, 孙永卫, 原青云, 等. 航天器背面接地介质材料等离子体充电研究[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 103204. (Cao Hefei, Sun Yongwei, Yuan Qingyun, et al. Research on surface charging of back grounded dielectric material of spacecraft[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 103204)
- [13] 方兴东, 关志成, 王黎明. 高压脉冲电在水处理中的应用及发展[J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 29-31. (Fang Xingdong, Guan Zhicheng, Wang Liming. Research on treatment of wastewater by high voltage pulse discharge[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(1): 29-31)
- [14] Belehradek M, Domenge C. Electrochemotherapy, a new antitumor treatment. First clinical phase I-II trial[J]. Cancer, 1993, 72(12): 3694-3700.
- [15] Li Zi, Liu Haotian, Rao Junfeng, et al. A novel drive circuit with overcurrent protection for solid state pulse generators[J]. IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(2): 361-366.
- [16] Zhou Ziwei, Li Zi, Rao Junfeng, et al. A high-performance drive circuit for all solid-stage Marx generator[J]. IEEE Trans Plasma Science, 2016, 44(11): 2779-2784.
- [17] Barnes M J, Wait G D, Figley C B. A FET based frequency and duty factor agile 6 kV pulse generator[C]//Twenty-First International Power Modulator Symposium Conference. 1994: 97-100.
- [18] Wang Yifan, Liu Kefu, Qiu Jian, et al. A stage-stage paralleled topology of all-solid-stage Marx generator for high current[J]. IEEE Trans Plasma Science, 2019, 47(10): 4488-4494.