

# 基于多变压器的双极性 Marx 电路

吴兆康, 陈希有, 牟宪民, 吴茂鹏  
(大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 现有的高压发生器技术如特斯拉变压器、线性变压器驱动器 (LTD) 以及脉冲形成网络 (PFN) 等, 有着对频率敏感、带载能力弱以及无法产生周期性脉冲等问题, 本文提出一种结合全固态 Marx 发生器与变压器技术的双极性 Marx 发生器方案。本系统的主电路由两套 Marx 发生器与多组双变压器组成, 通过光纤与光耦的形式对主电路与控制电路进行隔离, 利用自举电路对驱动芯片进行供电。首先对本文所设计的双极性 Marx 电路拓扑进行分析, 并计算所需要的参数, 然后采用 SIMPLIS 电路仿真软件验证可行性, 最后研制样机并测试性能。理论与实验结果表明, 本文所设计的双极性 Marx 电路可以产生幅值范围 0~8 kV、频率 20~40 kHz 的双极性高压方波, 工作频率稳定可调且带载能力强。

**关键词:** 双极性; 全固态 Marx 电路; 变压器; 高频高压

**DOI:** 10.12067/ATEEE2004004      **文章编号:** 1003-3076(2020)11-0059-07      **中图分类号:** TM832

## 1 引言

近年来, 随着脉冲功率技术的快速发展和应用领域的不断拓宽, 高压发生器在生物医学、食品加工、电磁成形等领域的需求日渐增大。现有的高压发生器如逆变器结合特斯拉线圈<sup>[1-3]</sup>、线性变压器驱动器 (LTD)<sup>[4-6]</sup> 和脉冲形成网络 (PFN)<sup>[7-9]</sup> 等有着体积过大、无法重复在高频下工作和系统对频率敏感等问题, 所以一种小体积、模块化以及工作频率与输出电压稳定可调的高频高压电源的研究是非常必要的。

目前国内外学者对高压发生器的设计方法已经有了一定的研究基础, Marx 电路非常适于产生占空比、频率和幅值可调的高压输出, 采用并联充电、串联放电的形式, 从而实现高压输出<sup>[10]</sup>。但由于 Marx 电路的每级都处于不同的电位, 因此需要隔离电源或采用自举电路给每级驱动芯片进行隔离供电<sup>[11]</sup>。熊兰、马龙等人利用传统的 Marx 发生器, 在输出端并联 1 个 H 桥得到正、负极性的高压。但是因为桥臂上会承受极高的电压, 使用这种方法必须配合串联均压技术, 结构很复杂<sup>[12]</sup>。L. M. Redondo

采用四开关结构的 Marx 电路进行极性的转换, 但这种方式的缺点是某一级充电开关发生故障时, 后一级电容都无法进行正常充电<sup>[13]</sup>。西安交通大学的学者 Ying Liu, Rui Fan 等将两个 Marx 电路级联起来, 这种结构省去了全桥逆变, 但是为了达到 10 kV 以上的电压, 使用了近百个 MOSFET<sup>[14]</sup>。

基于以上的研究, 为了解决双极性 Marx 电路开关过多、H 桥臂上电压过高的问题, 本文提出一种结合 LTD 电路与全固态 Marx 电路思想的双极性 Marx 电路, 在保持高的电压变比时, 减少了开关器件的数量。采用 SIMPLIS 软件进行电路仿真, 证明了该方案的可行性, 并得到实验验证。该电源采用两组单独的 Marx 电路, 不存在某一级故障后一极无法充电的问题, 每级的 MOSFET 均采用电光-光电隔离与自举电路进行驱动。根据本课题组的应用背景确定高频高压电源的设计参数: 幅值为 0~8 kV, 工作频率可达 40 kHz, 且连续可调。

## 2 系统结构简介

基于多变压器的双极性 Marx 电路结构如图 1 所示, 该电路由 Marx 升压部分与双变压器升压部分

收稿日期: 2020-04-01  
基金项目: 国家自然科学基金项目 (51877025)  
作者简介: 吴兆康 (1994-), 男, 湖北籍, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术等;  
陈希有 (1962-), 男, 黑龙江籍, 教授, 博士生导师, 研究方向为绿色电力变换与无线电能传输等。

构成。从 MOSFET 上看, MOS<sub>1~8</sub> 属于上组 Marx 发生器, MOS<sub>9~16</sub> 属于下组 Marx 发生器。与其他结构的双极性 Marx 电路相比, 在相同升压比的情况下极大地减少了开关个数, 不需要动辄使用上百个开关器件, 从而使得结构更加紧凑。

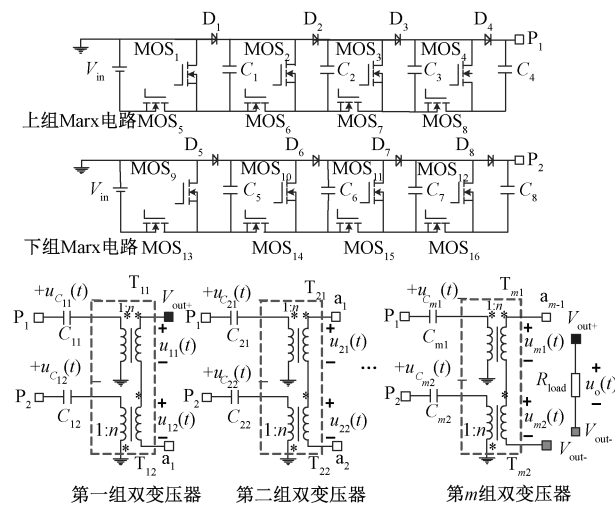


图1 基于多组变压器的双极性 Marx 电路

Fig.1 Bipolar Marx circuit based on multiple transformers

本文设计的 Marx 电路共有 4 级, 每一级包含 2 个全控型开关器件, 1 个二极管与 1 个储能电容。每一组双变压器的两个初级线圈分别通过隔直电容与两个 Marx 电路输出连接, 且同一组双变压器的输出绕组串联,  $m$  组双变压器一次绕组连接方式均一致, 二次绕组与上一组双变压器串联。

### 3 基于多变压器的双极性 Marx 电路的工作原理分析

#### 3.1 工作原理

在不同开关状态下电流的流向如图 2 所示。为方便叙述, 将处在水平位置的二极管与 MOSFET 称为充电二极管或充电 MOSFET (  $D_{1~4}$ 、 $MOS_{5~8}$  和  $MOS_{13~16}$  ); 垂直位置的 MOSFET 称为放电 MOSFET (  $MOS_{1~4}$  和  $MOS_{9~12}$  ), 各个电量的参考方向在图中标明。

如图 2(a) 所示, 上组 Marx 电路工作在充电状态, 下组 Marx 电路工作在放电状态。上组 Marx 电路的充电 MOSFET 和充电二极管导通, 经过短暂的充电后, 储能电容上的电压等于直流电源的电压。下组 Marx 电路的充电 MOSFET 和充电二极管处于关闭状态, 且每级充电 MOSFET 与充电二极管两端电压等于该级储能电容的电压, 由此可得:

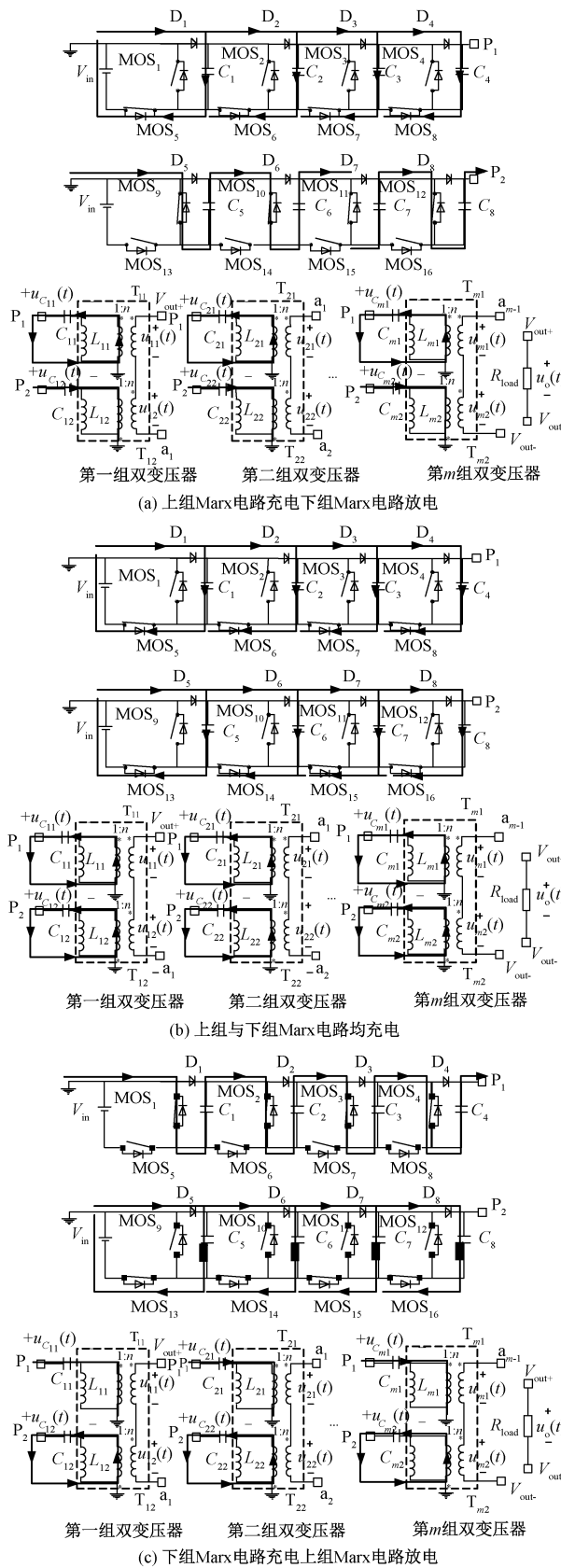


图2 基于多组变压器的双极性 Marx 电路工作原理

Fig.2 Working principle of bipolar Marx circuit based on multiple transformers

$$V_{in} = V_{C_{1-4}} = V_{MOS_{1-4}} = V_{MOS_{13-16}} = V_{D_{5-8}} = V_{C_{5-8}} \quad (1)$$

此时第一组双变压器中上变压器  $T_{11}$  的初级绕组与隔直电容  $C_{11}$  构成了一个回路,则  $u_{11}(t)$  为:

$$u_{11}(t) = -V_{C_{11}} \quad (2)$$

下组 Marx 电路此时工作于放电状态,第一组双变压器的下变压器  $T_{12}$  的一次绕组、下组 Marx 电路与隔直电容  $C_{12}$  构成了一个回路,设置  $p$  为 Marx 电路的级数,则  $T_{12}$  一次绕组的电压  $u_{12}(t)$  为:

$$u_{12}(t) = pV_{in} - V_{C_{12}} \quad (3)$$

如果变压器的变比为  $1:n$ , 设有  $m$  组双变压器输出绕组首尾相连,由式(1)~式(3)可知,规定此时电路为负状态,如表 1 所示,输出电压  $u_o(t)$  为:

$$u_o(t) = mn[u_1(t) - u_2(t)] = -mnpV_{in} \quad (4)$$

表 1 电路的工作模式

Tab.1 Operational modes of electric circuit

状态	符号	充电开关	放电开关
a	负	MOS <sub>5-8</sub>	MOS <sub>9-12</sub>
b	零	MOS <sub>5-8</sub> , MOS <sub>13-16</sub>	无
c	正	MOS <sub>13-16</sub>	MOS <sub>1-4</sub>

如图 2(b)所示,上、下两组 Marx 电路都工作于充电状态,此时各个变压器一次绕组上电压与隔直电容上电压相等。因为同一组双变压器的上、下两变压器  $T_{11}$  与  $T_{12}$  的同名端关系相反,输出电压相互叠加后抵消,  $u_o(t)$  为 0,规定此时为零状态。

如图 2(c)所示,此时上、下两组 Marx 电路的工作状态与图 2(a)相反,规定此时为正状态,  $u_o(t)$  为:

$$u_o(t) = +mnpV_{in} \quad (5)$$

由上文分析可知,通过控制开关处于不同的工作状态可以使得  $u_o(t)$  分别工作于负、零与正三种状态。

四路驱动电压 (MOS<sub>1-4</sub>, MOS<sub>5-8</sub>, MOS<sub>9-12</sub> 与 MOS<sub>13-16</sub>) 如图 3 所示,同一组 Marx 电路的充电、放电开关的驱动电压在时序上互补, MOS<sub>1-4</sub> 中标注的 a、b 与 c 对应图 2 与表 1 中分析的三个状态;两个 Marx 电路相位上相差 180°;  $u_o(t)$  为整个系统输出的双极性高压,幅值为  $mnpV_{in}$ 。

基于多变压器的双极性 Marx 电路的控制信号通过 TMS320F28335 型 DSP 产生与调节,为了防止高压信号干扰到控制器,控制信号通过光纤进行电光/光电转换传输到驱动电路,通过自举驱动方式为四组一共 16 个驱动芯片供电。

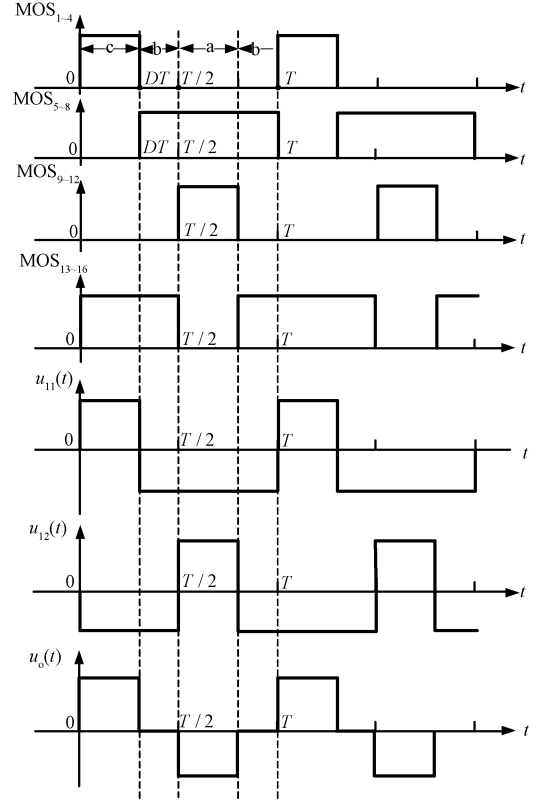


图 3 控制信号时序图

Fig.3 Sequence diagram of control signals

### 3.2 主电路器件选择与参数设计

#### 3.2.1 储能电容计算

由于整个电源系统中既有容性也有感性器件,如果用时域方法分析储能电容 ( $C_1 \sim C_8$ ) 的设计则过于复杂,本文从能量角度分析储能电容的设计。从  $0 \sim DT$  内所有储能电容上的能量损失等于整个周期内负载上的能量消耗,如式(6)~式(8)所示:

$$\frac{1}{2}pC_{min}(V_{initial}^2 - V_{final}^2)f \times 2 = \frac{V_{rms}^2}{R_{load}} \quad (6)$$

$$V_p = mnpV_{in} \quad (7)$$

$$V_{rms} = \sqrt{D}V_p \quad (8)$$

式中,  $C_{min}$  为储能电容的最小容值;  $V_{initial}$  为储能电容的初始电压,在数值上等于  $V_{in}$ ;  $V_{final}$  为储能电容电压放电后的终值,为保持输出幅值基本不变,规定为  $V_{initial}$  的 90%;  $f$  为系统的工作频率,取 25 kHz;  $D$  为系统的最大占空比,取 0.3;  $V_p$  为输出电压的幅值,取 8 kV;  $V_{rms}$  为输出电压的有效值;  $m$  取 2,  $n$  取 5,由此可得  $C_{min}$  的计算式为:

$$C_{min} = \frac{Dpm^2n^2}{0.19fR_{load}} \quad (9)$$

代入数据后可得储能电容最小值的取值为





如图 5 所示,首先控制器产生两路上组 Marx 电路的互补控制信号,经过光纤传输取反后产生  $\text{Control}_{1\sim 4}$  与  $\text{Control}_{5\sim 8}$ ,且每个 Control 信号要给四个 FOD8342TR2 光耦隔离驱动芯片提供输入信号。为提高驱动波形的质量,减少电磁干扰对驱动信号的影响,每个 Control 信号作为推挽驱动芯片 MCP1407 的输入,Q 信号作为输出, $Q_{1\sim 8}$  分别作为光耦隔离驱动芯片  $U_{1\sim 8}$  的输入。

因为电路中的 MOSFET 之间首尾相接,可以采用自举驱动方式为驱动芯片供电,每两个形成自举关系的光耦隔离芯片之间均有一个自举二极管与自举电容相连接。上组 Marx 电路的驱动电路中形成自举关系的芯片有: $U_1$  与  $U_5$ 、 $U_2$  与  $U_6$ 、 $U_3$  与  $U_7$ 、 $U_4$  与  $U_8$  (这四对芯片工作时在时序上互补,每对芯片分别通过级内自举二极管  $D_{n1\sim 4}$  进行自举)与  $U_5$  与  $U_6$ 、 $U_6$  与  $U_7$ 、 $U_7$  与  $U_8$  (这三对芯片工作时在时序上相同,分别通过级间自举二极管  $D_{z1\sim 3}$  进行自举)。

驱动电路的总供电电压设计为 24 V,这是因为后三对芯片在自举供电时,每经过一个自举二极管,就会导致总供电电压有一个 PN 结的压降,经过实验测量约为 1.2 V,为保证每个 LDO7815 芯片给 FOD8342TR2 供电时输入电压大于 15 V,24 V 的总供电电压将是很合适的。

4 仿真和实验

4.1 系统仿真研究

根据上文设计的电路,通过 SIMPLIS 电路仿真软件建立主电路与驱动电路的模型,电路仿真模型所需要的参数如表 3 所示。

表 3 电路仿真模型的参数

Tab.3 Parameters of circuit simulation

参数	数值
储能电容/ $\mu\text{F}$	4
隔直电容/ $\mu\text{F}$	1.5
自举电容/ $\mu\text{F}$	1
输入电压 $V_{\text{in}}/\text{V}$	0~200
工作频率 $f/\text{kHz}$	20~40
输出脉冲占空比 $D$	0~0.3
死区时间	5%~10 %
励磁电感 $L_{\text{m}}/\text{mH}$	1
负载电阻 $R_{\text{load}}/\text{k}\Omega$	10
Marx 电路级数 $p$	4
双变压器组数 $m$	2
变压器匝比 $n$	5

根据上文参数在不同条件下进行仿真,不同输

入电压下的输出电压如图 6(a)、6(b)所示,分别为 20 kHz 与 40 kHz 下进行的仿真结果。由表 3 与图 6 可知,输入电压与输出电压的幅值满足 1:40 的关系。

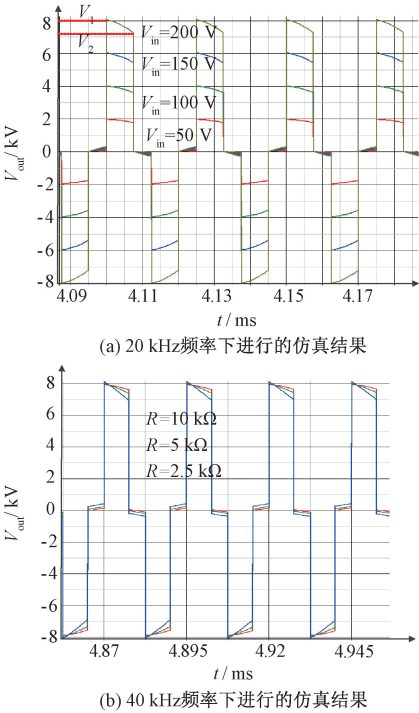


图 6 不同输入电压下的输出电压

Fig.6 Output voltages at different input voltages

如图 6(a)所示,设输出电压在储能电容放电开始时电压为  $V_1$ , 储能电容放电结束后输出电压为  $V_2$ , 且  $V_1 = 8\,073\text{ V}$ ,  $V_2 = 7\,261\text{ V}$ 。在这里规定输出电压的顶降率  $\Delta V$  可由式(13)计算。

$$\Delta V = \frac{V_1 - V_2}{V_1} = \frac{8\,073\text{ V} - 7\,261\text{ V}}{8\,073\text{ V}} \times 100\% = 10.05\%$$

(13)

4.2 实验研究

为验证前文的分析,搭建了实验样机,如图 7 所示。实验时,设置输入电压分别为 50 V、100 V、150 V 与 200 V,工作频率为 20 kHz,占空比为 0.3,死区时间为 5%的工作周期,负载选用 10 kΩ 的绕线电阻。驱动电路的供电采用 24 V/3 A 的隔离式开关电源,主电路的供电则采用三相调压器经过整流滤波后的直流电压。直流输入电压分别为 50 V、100 V、150 V 与 200 V,得到的电压波形如图 8 所示,输出电压的波形与理论仿真基本一致,最大功率达到 3 840 W。

再对不同负载下的输出电压进行研究,通过按



图 7 基于多变压器的双极性 Marx 电路的测试

Fig.7 Testing of bipolar Marx circuit based on multiple transformers

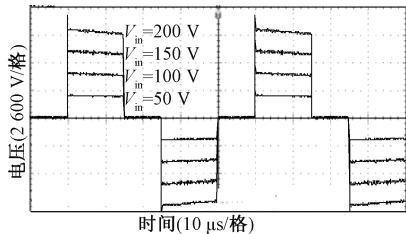


图 8 不同输入电压下的输出电压

Fig.8 Output voltages at different input voltages

键调节 DSP 控制程序使得系统工作频率为 40 kHz, 负载分别选用 10 kΩ 与 7.5 kΩ 的绕线电阻。电压波形如图 9 所示,在负载增加时输出电压的顶降率略有下降,在可接受范围内。实现了带载能力强且工作频率稳定可调的设计目标。

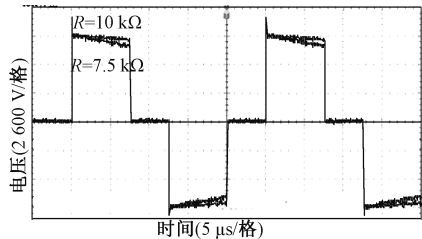


图 9 不同负载电阻下的输出电压

Fig.9 Output voltages at different load resistances

5 结 论

本文所设计的双极性 Marx 发生器相比于其他的高压发生器拓扑如特斯拉线圈、LTD 电路与 PFN 技术等具有如下优点:该结构空间利用率更高,有利于结构的紧凑型与装置的小型化设计;带负载能力强,对负载变化不敏感,能通过 DSP 调节使其稳定工作在需要的频率与占空比下。

参考文献 (References):

[ 1 ] Chen X, Chen J, Li G, et al. Electric-field-coupled-wire power transmission—analytical model and experimental demonstration [ A ]. 2017 IEEE International Symposium on Power Electronics (Ee) [ C ]. 2017. 1-6.

[ 2 ] 陈希有, 陈建辉, 牟宪民, 等 ( Chen Xiyou, Chen Jianhui, Mu Xianmin, et al. ). 空间电场耦合单线电力传输: 仿真、理解与构建 (Single-wire power transmission based on spatial electric field coupling: Simulation, understanding and construction) [ J ]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37 ( 19 ): 5749-5758, 5852.

[ 3 ] 张泽然, 陈希有, 周宇翔, 等 ( Zhang Zeran, Chen Xiyou, Zhou Yuxiang, et al. ). 单线电能传输的实验研究 (Experimental research of single line power transmission) [ J ]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 ( 10 ): 69-74.

[ 4 ] 王昌金 ( Wang Changjin ). 基于 Marx 和 LTD 拓扑的全固态复合模式脉冲源的研制 (The development of all solid-state mixed pulse generator based on Marx and LTD topologies) [ D ]. 重庆: 重庆大学 ( Chongqing: Chongqing University ), 2018.

[ 5 ] 江伟华 ( Jiang Weihua ). 基于半导体开关的高重频 LTD (High-frequency repetitive LTD based on semiconductor switches) [ J ]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2015, 41 ( 6 ): 1776-1780.

[ 6 ] 冯昱, 毛越波, 罗海云, 等 ( Feng Yu, Mao Yuebo, Luo Haiyun, et al. ). 全固态高重复频率 LTD 的性能测试和特性分析 (Performance test and analysis based on solid-state high repetitive frequency LTD) [ J ]. 强激光与粒子束 (High Power Laser and Particle Beams), 2018, 30 ( 4 ): 100-104.

[ 7 ] Harchandani R, Gorade P. Pulse forming network for Marx generator with boosting operation [ A ]. 2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTE-ICT) [ C ]. 2017. 1768-1771.

[ 8 ] 李飞, 张恺烨, 朱明冬, 等 ( Li Fei, Zhang Kaiye, Zhu Mingdong, et al. ). 百纳秒近方波高压脉冲形成模块的设计与实验研究 (High-voltage pulse forming module with hundreds-nanosecond quasi-squared output pulse) [ J ]. 强激光与粒子束 (High Power Laser and Particle Beams), 2018, 30 ( 8 ): 123-128.

- [ 9 ] 孙连华, 孙鹂鸿, 严萍, 等 (Sun Lianhua, Sun Yao-hong, Yan Ping, et al.). 重复推进系统中脉冲功率源研制及应用 (Research on discharge of superconducting magnet to inductive load) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2010, 29 (4): 78-82.
- [10] 虞超群, 嵇保健, 孙柯, 等 (Yu Chaoqun, Ji Baojian, Sun Ke, et al.). 基于移相控制技术的纳秒级高压窄脉冲电源研究 (Design of voltage pulsed power generator based on technology of phased-shifted control) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (9): 55-59.
- [11] Zhou Z, Li Z, Rao J, et al. A high-performance drive circuit for all solid-state Marx generator [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44 (11): 2779-2784.
- [12] 熊兰, 马龙, 胡国辉, 等 (Xiong Lan, Ma Long, Hu Guohui, et al.). 具有负载普适性的高压双极性方波脉冲源研制 (A newly high-voltage square bipolar pulse generator for various loads) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (12): 51-60.
- [13] Redondo L M. New four-switches bipolar solid-state Marx generator [A]. 2013 19th IEEE Pulsed Power Conference (PPC) [C]. 2013. 1-5.
- [14] 刘任, 李琳 (Liu Ren, Li Lin). 基于损耗分离理论的非正弦激励磁心损耗计算方法研究 (Research on calculation methods for core losses under nonsinusoidal excitation based on loss separation theory) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (9): 1-9.
- [15] Liu Y, Fan R, Zhang X, et al. Bipolar high voltage pulse generator without H-bridge based on cascade of positive and negative Marx generators [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26 (2): 476-483.

# Bipolar Marx circuit based on multiple transformers

WU Zhao-kang, CHEN Xi-you, MU Xian-min, WU Mao-peng

(School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Existing high-voltage generator technologies, such as Tesla transformer, LTD circuit and pulse forming network (PFN), have the problems of being sensitive to frequency, weak load capacity and disability to work repeatedly. This paper proposes a scheme of bipolar high-frequency high-voltage generator which combines the all-solid Marx generator and the transformer technology. The main circuit of the system is composed of two sets of Marx generators and multiple sets of transformers, which is isolated from the control circuit by optical fiber and opto-couplers, and the electric power drive chip is supplied by bootstrap circuit. Firstly, the topology of bipolar high voltage source designed in this paper is analyzed and the required parameters are calculated. Then the feasibility is verified by SIMPLIS circuit simulation software. Finally, a prototype is developed and its performance is tested. The theoretical and experimental results show that the designed bipolar high voltage source can produce square waves with amplitude range of 0~8 kV and frequency range of 20~40 kHz, with stable and adjustable working frequency and strong load capacity.

**Key words:** bipolar; all-solid-state Marx circuit; transformer; high-frequency and high-voltage