

文章编号: 2095-4980(2019)02-0327-05

14 级紧凑 Marx 发生器自击穿建立的分析与实验

张北镇, 王淦平, 宋法伦, 罗光耀, 杨晓亮

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所 高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: 使用六氟化硫(SF₆)及其混合气体做绝缘介质, 并提高工作气压, 增加绝缘强度, 利于实现Marx发生器的小型化、轻量化。为保障Marx发生器的顺利建立, 一般需要使用触发电源。某些场合下, 去掉触发源, Marx依靠开关自击穿建立, 可提升Marx发生器的使用便利性, 降低维护难度。搭建了14级气绝缘Marx发生器, 当工作气压逐渐升高时, Marx发生器依靠开关自击穿建立变得困难。对Marx发生器建立过程进行理论分析及开关电极的优化验证实验, 改进了Marx发生器开关的电极形状及组合形式。实验表明, 改进后的Marx发生器在高气压下的自击穿建立概率提高了。研制的Marx发生器工作在0.25 MPa的六氟化硫下, 结构紧凑, 体积较小, 在45 Ω的水负载上获得约7 GW, 脉宽70 ns的电压输出。

关键词: 脉冲功率源; Marx 发生器; 火花隙开关; 罗可夫斯基电极

中图分类号: TN98

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201902.0327

Improvement on the erecting stability of a 14-stage self-breaking Marx generator

ZHANG Beizhen, WANG Ganping, SONG Falun, LUO Guangyao, YANG Xiaoliang

(Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Institute of Applied Electronics,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: As a High Power Microwave(HPM) driver, in order to achieve minimization and lightweight, a Marx generator is usually immersed in SF₆ or a mixture which contains it. Raising the gas pressure, which would improve the insulation, will facilitate the reduction of the Marx volume. Usually, an external trigger is utilized to ensure the erection of Marx generator. For simplicity and convenience, an attempt of discarding the trigger and erecting the Marx only by self-break spark gaps is made. A 14-stage Marx is established and experiments on that show it is very difficult to erect a Marx when pressure is higher than 0.16 MPa. By analyzing the erection process and optimizing the shape of electrode in spark gaps, a serial of experiments are conducted, and the results indicate that the erecting probability is improved. Finally, a compact Marx generator, working in 0.25 MPa SF₆ without trigger, is established, and a 7 GW, 70 ns output is obtained on a 45 Ω load.

Keywords: pulsed power; Marx generator; spark gap; Rogowski electrode

重复频率运行的紧凑 Marx 发生器, 是当前脉冲功率技术的一个发展热点, 可用来直接驱动高功率微波负载, 已取得很有价值的进展^[1-6]。在某些特定的使用环境下, 要求 Marx 发生器具有较低的时间及电压抖动, 为此, 通常使用触发源对 Marx 发生器的前几级开关进行触发。

在一些对 Marx 输出时间抖动要求宽松的场合, 如果能够不使用触发源, 则脉冲系统结构更简练, 维护更便利。对此, 已有人开展研究, 利用特殊的开关结构, 使得开关击穿后的紫外线相互照射加速其余开关的击穿。而对于某些 Marx, 则难以使用这种特殊的开关结构。

本文梳理了 Marx 发生器建立过程, 着重分析了自击穿建立的要素, 提出一种提高 Marx 自击穿建立概率的思路。

1 Marx 发生器建立过程

Marx 发生器是一种对储能元件并联充电, 串联放电, 获得高压的电路装置。一个典型的 Marx 发生器, 由储能电容、气体火花开关、充电电阻和接地电阻构成。对于其建立过程, 通常的描述是^[7-9]: 当储能电容上的充电电压达到 U_0 时, 第 1 个开关间隙在外加触发下击穿, 第 2 个开关间隙承受电压变为 $2U_0$, 因过压而击穿, 这个过程继续持续下去, 进而所有开关依次导通。

这样的分析有一个前提, 即各级电容都存在一个对地的分布电容 C_g , 且不可忽略。考虑 C_g 的影响后, 对于采用隔离电阻 R 的 Marx 发生器, 第二级开关获得 $2U_0$ 过压的持续时间约为 $3RC_g$; 如果采用电感隔离, 则过压持续时间约为 $\frac{\pi}{2}\sqrt{LC_g}$, 持续时间长短取决于对地电容 C_g 的大小。很多情况下, 对地电容很小, 只有几皮法, 这一过压时间可能会低至几纳秒, 过短的脉冲高压不足以导致间隙击穿。理论上, Marx 发生器只需触发第一级开关即可, 因为后续开关将获得强烈的 2 倍过压, 然而在实践中, 很少只触发第一级开关。

因此, 针对设计的电感隔离正负充电 Marx 发生器, 忽略对地电容的影响, 分析其建立过程, 图 1 为电路示意图。图 1 中, 第一级开关在充电至 U_0 时击穿后, 理想情况下, 原 nU_0 的电压迅速分布在其余 $n-1$ 个开关间隙上。第二级开关获得的过压倍数约为 $\frac{n}{n-1}$, 过压持续时间近似为 $\frac{n}{n-1} \times \frac{\pi}{2}\sqrt{LC_0}$ 。过压持续时间内, 如果第 2 级开关没有击穿, 其过压状态将迅速丢失, Marx 建立失败。还有一种可能, 第一级开关击穿后, Marx 发生器高压端的开关耐压发生振荡, 在时间 $n \times \frac{\pi}{2}\sqrt{LC_0}$ 内归零, 接着会发生电压反向。如果电路中的杂散电阻足够小, 则会发生反向过压, 如果过压系数足够大, 高压端开关击穿, 继而依次击穿, Marx 建立。

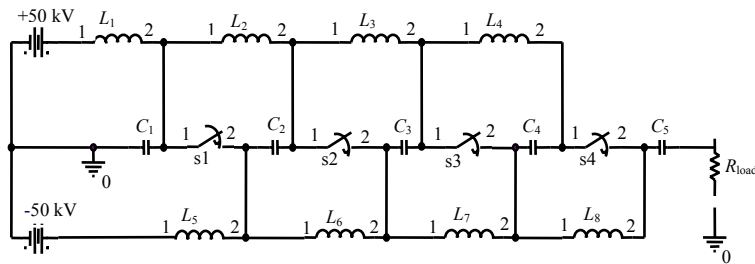


Fig.1 Simplified circuit of a Marx isolated by inductance and charged with both positive and negative voltage

图 1 电感隔离正负充电 Marx 发生器原理电路

据此, Marx 发生器的建立过程有快建立和慢建立 2 种。第一级开关击穿后, 紧邻的开关在时间 $\frac{1}{n-1} \times \frac{\pi}{2}\sqrt{LC_0}$ 内过压击穿, 从而 Marx 建立, 这是 Marx 发生器的快建立过程; 第一级开关击穿, 经过时间 $n \times \frac{\pi}{2}\sqrt{LC_0}$ 后, 高压端的开关反向过压击穿, 导致 Marx 的建立, 这是 Marx 发生器的慢建立过程。如果电路中的电阻, 包括电感电阻、引线电阻、连接电阻等很大, 则高压端开关的过压不一定发生, Marx 发生器的慢建立就不会发生。慢建立过程时间长, 抖动大, 建立成功率低, 而且触发之后的过压不够, 因此不采用。为保证 Marx 发生器工作可靠, 最好工作在快建立模式, 即要求第二级的开关过压足够大, 因此有:

$$m \times \frac{n}{n-n'} > 1 \quad (1)$$

式中: n 是 Marx 的级数; n' 是触发的级数; m 是开关工作欠比 ($m < 1$)。对于自击穿来讲, $n'=1$ 。

对于 Marx 发生器, 如果选定充电电压 U_0 , 则开关自击穿电压为 U_0/m 。实际上开关的自击穿电压存在抖动^[10], 假设自击穿电压的波动范围为 $(1 \pm 3\sigma)U_0/m$, 其中, σ 是抖动的方差。如果级数 n 足够多, 存在某个开关在电压 $(1-3\sigma)U_0/m$ 时击穿, 这几乎是必然, 且是随机出现的, 但不能保证第一级开关先击穿。假设有方法使第一个开关在 $(1-3\sigma)U_0/m$ 时先发生自击穿, 为了让第二级开关过压击穿, 经过推导可知, 最好满足一个近似关系式:

$$\sigma < \frac{1}{3n} \quad (2)$$

当 Marx 发生器的工作环境为大气、氮气, 当气压不高时, 不依赖触发, 完全依靠各级开关自击穿建立相对容易。为减小体积, 提高绝缘强度, 当提高工作气压时, 自击穿建立逐渐变得困难。有实验表明, 当 SF_6 气压(表压)高于 0.16 MPa 时, 自击穿建立变得极其困难^[11]。因为, 开关的抖动随着气压的增高而增大。当 SF_6 工作气压

高于一定程度时,开关的抖动不满足过压要求,且无法确保第一级开关最先击穿。缩短第一级开关的间距,期望它们首先发生自击穿,效果微乎其微。从式(2)也可看出,自击穿的 Marx 级数不宜过多。

根据前文的分析,自击穿建立 Marx,获得良好建立概率的条件为:a)设法提高开关的过压以及增加过压持续时间,包括增大隔离电感,增大对地电容,减小 Marx 级数;b)确保第一级(或前几级)开关首先发生自击穿,且抖动越低越好。其中,第一个条件无论对于触发工作还是自击穿工作的 Marx 都是有利的,第二个条件本身可依靠触发源保证。

2 开关抖动实验

首先设法降低第一级开关的抖动。Marx 发生器中使用的开关,通常选择场不均匀系数大的电极,如球隙或环形轨道。图 2(a)为本文使用的一种环形轨道开关,尝试与均匀场电极对比。常见的均匀场电极有罗克夫斯基电极、张氏电极、ernst 电极^[12-13]。严格的罗克夫斯基型,其表面不收敛,必须做近似拟合。因此选取一种利用正弦曲线拟合的罗克夫斯基型电极^[14],图 2(b)为设计的罗克夫斯基电极。

实验平台电路见图 3,电源的充电能力为正负 50 kV,匹配负载 360 nF,充电时间约 30~40 ms。设计不同的开关,改变电极形状,调节电极间距,进行实验。

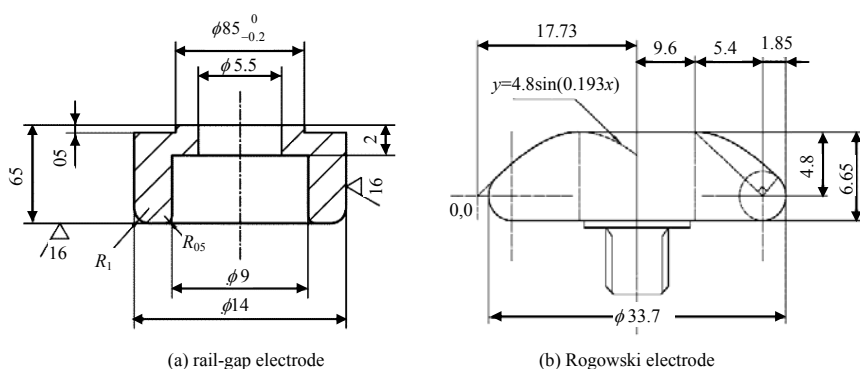


Fig.2 Electrode used in switch
图2 开关用电极

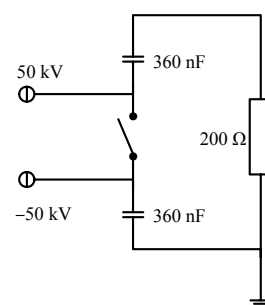


Fig.3 Circuit of jitter testing experiment
图3 开关抖动测试电路

使用 2 种电极,进行不同的间距、气体类型和气压对比实验。结果显示,在 SF_6 中,罗克夫斯基电极的抖动低于环形轨道电极,因为一个均匀的电场有利于降低开关的抖动。图 4 是电极表面的烧蚀分布情况,可见在电极平面部分烧蚀较平均,表明开关设计是合理的。在 Marx 充电过程中,期望达到预期电压时,第一级开关击穿,因此关注自击穿电压的抖动。图 5 是罗克夫斯基电极在 SF_6 中,1 Hz 连续自击穿 10 次的典型电压波形,可以看出,有 1 次自击穿电压明显过低。使用这种罗克夫斯基电极作为 Marx 发生器的前几级开关进行实验。



Fig.4 Erosion distribution on Rogowski electrode
图4 罗克夫斯基电极表面烧蚀情况图

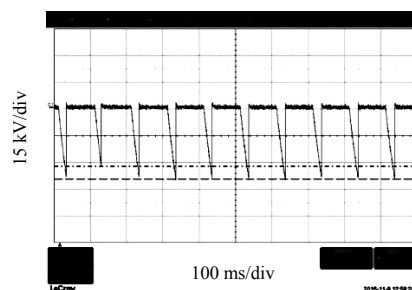


Fig.5 10 waveforms of self-break under 1 Hz
图5 1 Hz,10 次开关自击穿波形

3 Marx 发生器自击穿建立实验

据前文分析,Marx 级数不宜过多,因此搭建了 14 级 Marx。储能单元使用一种双模块的脉冲形成网络单元^[15],单个设计阻抗约 3.2 Ω。图 6 为其结构图,整体放置在钢制箱体内,采用 SF_6 (纯度约 95%)气体绝缘。使用约 45 Ω 的水负载进行调试。起初,全部开关采用环形轨道电极,随着实验状态改变,当 SF_6 气压(表压)约为 0.15 MPa

以上时, Marx 发生器的建立变得极其困难。经尝试缩短前几级电极间距, 效果微乎其微。

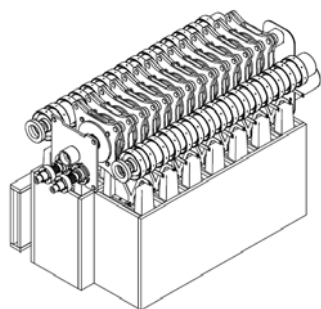


Fig.6 Structure of a Marx generator
图 6 Marx 发生器内部结构图

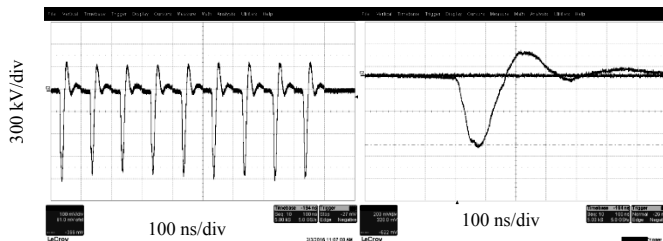


Fig.7 Outputs of the Marx generator
图 7 Marx 发生器输出波形

接下来, 在前两级使用罗氏电极。建立情况有所改善, 但效果有限。随着气压进一步升高, 建立失败。根据分析, 前两级罗氏电极开关很难确保同时击穿, 或者第一级首先击穿。因此, 在第一级开关采用罗可夫斯基电极, 并谨慎调节其电极间距, 控制击穿电压, 最终获得稍好的建立概率。图 7 为实验结果, 工作气压约 0.25 MPa, 频率 1 Hz, 连续运行 10 次, 建立成功 9 次。有一次开关的击穿电压过低, 导致后续开关过压不足, 建立失败。经多组重频运行结果显示, 建立概率大于 90%。

4 结论

Marx 发生器工作在约 0.15 MPa 以上的 SF_6 中时, 依靠开关自击穿建立困难。提高 Marx 发生器自击穿建立概率的首要条件是, 确保第一级开关首先击穿, 且开关的抖动低。辅助手段包括: 增大隔离电感、增大对地电容、减小 Marx 级数。在 SF_6 中使用罗可夫斯基电极, 相比环形轨道电极, 能获得较低的抖动。经综合调试, 提高了高气压下 Marx 发生器的自击穿建立概率。

这种方式研制自击穿 Marx 存在一定局限, 首先是气压应用范围有限, 约 0.15~0.3 MPa, 气压过高, 随着抖动进一步增大, 自击穿建立更加困难; 其次 Marx 发生器的级数不能过多, 级数过多对开关抖动的要求更严苛。

脉冲功率装置的小型化是当前发展趋势, 一方面指脉冲高压产生系统的小型化, 另一方面, 也包含附属装置, 即充电电源和触发源的小型化。本文为去掉脉冲功率装置的触发源提供了可行性, 一方面可提升 Marx 发生器的使用便利性, 降低维护难度; 另一方面压缩了整个装置的体积, 满足某些特定用途。

参考文献:

- [1] 宋法伦, 金晓, 李飞, 等. 20 GW 紧凑 Marx 型重复频率脉冲驱动源研制进展[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(2): 169-172. (SONG Falun, JIN Xiao, LI Fei, et al. Progress on 20 GW compact repetitive Marx generator development[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(2): 169-172.)
- [2] 刘金亮, 樊旭亮, 白国强, 等. 紧凑型 Marx 发生器高功率微波源研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(4): 757-764. (LIU Jinliang, FAN Xuliang, BAI Guoqiang, et al. Progress of based on compact Marx generator high power microwave source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(4): 757-764.)
- [3] 潘亚峰, 张喜波, 刘胜. 基于螺旋线的紧凑型高压纳秒脉冲发生器[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(2): 63-67. (PAN Yafeng, ZHANG Xibo, LIU Sheng. Compact high-voltage nanosecond pulse generator based on spiral forming line[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(2): 63-67.)
- [4] 李志强, 杨建华, 张建德, 等. 紧凑重频 PFN-Marx 脉冲发生器[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(1): 131-135. (LI Zhiqiang, YANG Jianhua, ZHANG Jiande, et al. A compact repetitive PFN-Marx generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(1): 131-135.)
- [5] 谢霖桑, 贾伟, 郭帆, 等. 百千伏紧凑型 Marx 发生器的研制[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(4): 161-164. (XIE Linshan, JIA Wei, GUO Fan, et al. Development of a 100 kV compact Marx generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(4): 161-164.)
- [6] 王庆峰. 紧凑型重复频率脉冲功率源的探索研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006. (WANG Qingfeng. Study on the compact repetitive pulse-power generator[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2008.)

- [7] HANSJOACHIM Bluhm. Pulsed power systems: principles and applications[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.
- [8] 韩旻, 邹晓兵. 脉冲功率技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010. (HAN Min, ZOU Xiaobing. Basis of the pulsed power technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.)
- [9] 卡兰塔罗夫 П Л, 采伊特林 Л А. 电感计算手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992. (КАЛАНТАРОВ П Л, ЦЕЙТЛИН Л А. The manual of inductance calculation[M]. Beijing: China Machine Press, 1992.)
- [10] 丛培天, 邱爱慈, 孙铁平, 等. 气体开关自击穿概率的分析方法比较[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(7): 1831–1834. (CONG Peitian, QIU Aici, SUN Tieping, et al. Comparison of Gaussian and Weibull models used for gas switch self-breakdown probability analysis[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(7): 1831–1834.)
- [11] 吴朝阳, 张现福, 张晋琪, 等. 14级紧凑型重复频率 Marx 发生器研制[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(5): 169–172. (WU Zhaoyang, ZHANG Xianfu, ZHANG Jinqi, et al. Development of 14-staged compact and repetitive Marx generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(5): 169–172.)
- [12] 张允禄, 董子丰, 陈锡荣, 等. 罗科夫斯基电极的设计方法[J]. 激光杂志, 1987, 8(4): 259–261. (ZHANG Yunlu, DONG Zifeng, CHEN Xirong, et al. A method for designing Rogowski's electrode[J]. Laser Journal, 1987, 8(4): 259–261.)
- [13] 郭亚丁, 谭荣清. 新型 Rogowski 电极的设计及分析[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(10): 46–50. (GUO Yading, TAN Rongqing. Design and analysis of new Rogowski electrode[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(10): 46–50.)
- [14] 解广润. 高压静电场[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987. (XIE Guangrun. High voltage electrostatic field[M]. Shanghai, China: Shanghai Science and Technology Press, 1987.)
- [15] 张北镇, 宋法伦. 基于双电容的 Marx 发生器输出特性仿真分析[J]. 微波学报, 2014(S1): 445–448. (ZHANG Beizhen, SONG Falun. Output simulations on a dual-capacitor-based Marx generator[J]. Journal of Microwaves, 2014(S1): 445–448.)

作者简介:



张北镇(1982–), 男, 河南省夏邑县人, 助理研究员, 主要研究方向为脉冲功率技术. email: 99477228@qq.com.

王淦平(1983–), 男, 山东省烟台市人, 副研究员, 主要研究方向为脉冲功率技术.

宋法伦(1977–), 男, 山东省临沂市人, 副研究员, 主要研究方向为高功率微波驱动源及器件.

罗光耀(1976–), 男, 南宁市人, 副研究员, 主要研究方向为脉冲功率初级能源技术.

杨晓亮(1986–), 男, 河南省新县人, 助理研究员, 主要研究方向为脉冲功率初级能源技术.