

文章编号: 1001-4322(2009)04-0637-04

# 全电感隔离型重复频率 Marx 发生器\*

张晋琪, 张现福, 杨周炳, 徐刚, 陆巍

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 介绍了发生器的结构特点,采用有限元数值方法对开关腔体内静电场进行了 3 维模拟计算,通过理论分析和实验研究,研制了 1 台 12 级重复频率 Marx 发生器,该发生器采用正负双边恒流充电方式及全电感隔离,其主要元器件间基本呈无感排列,结构简单、紧凑。实验结果显示:发生器输出电压为 532 kV,脉冲前沿约 40 ns,建立时间约 32 ns;开关腔内充纯净 SF<sub>6</sub> 气体,可以在重复频率 1~50 Hz 下稳定运行。

**关键词:** Marx 发生器; 恒流充电; 全电感隔离; 结构紧凑; 重复频率

**中图分类号:** TM832 **文献标志码:** A

Marx 发生器是高功率脉冲技术中最常见的功率源<sup>[1]</sup>,目前正朝着储能密度大、结构紧凑、重复频率运行方向发展。而采用电感作为电容器间隔离元件,和传统的用充电电阻隔离的发生器相比有明显的优势:同步范围宽、波形重复性好。只要采用合理的充电方式,就可以加快充电速度和提高充电效率,实现较高重复频率运行。本文在理论分析和静电场模拟的基础上设计、建造,并调试了一台输出电压 532 kV,重复频率 50 Hz 的 Marx 发生器,初步研究和掌握了全电感隔离型重复频率 Marx 发生器的关键技术。

## 1 Marx 发生器结构特点

12 级全电感隔离型重复频率 Marx 发生器主要元器件有:隔离电感、低感电容及带触发圆盘的场畸变开关。自制电感如图 1 所示,双层绝缘线绕制在筒性尼龙骨架表面,骨架内装有磁芯,磁芯采用棒状为  $\phi 10\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  锰锌铁氧体材料。带磁芯的棒状隔离电感,不存在磁饱和现象,既可增大电感值,又能减小电感体积。本文设计得出隔离电感  $L_i$  为  $200\ \mu\text{H}$ 。高功率脉冲技术中,要求 Marx 电路必须是低电感的,而电容器的电感又是回路电感的主要组成部分之一,因此本文采用由 2 个极板组成的塑壳陶瓷介质电容器,它具有介电常数大,寄生电感小( $< 20\ \text{nH}$ ),外形尺寸小( $100\ \text{mm} \times 56\ \text{mm} \times 120\ \text{mm}$ )的优势。

实现电容串联放电的场畸变开关与低感电容呈交错条形排列<sup>[2]</sup>,并与触发电阻、充电保护电感和隔离电感一同置于长方形金属变压器油箱内,如图 2 所示,除能减小 Marx 发生器的体积,保证电绝缘可靠,不发生闪络或击穿现象,还可以屏蔽向外界辐射的电磁波,同时也避免了高电压直接对外的危险。发生器系统油箱体积为  $1\ 000\ \text{mm} \times 500\ \text{mm} \times 400\ \text{mm}$ ,电容间及电容与开关间通过一定厚度( $d=5\ \text{mm}$ )的黄铜板牢固连接,放电回路基本呈无感排列,结构紧凑,回路电感小。

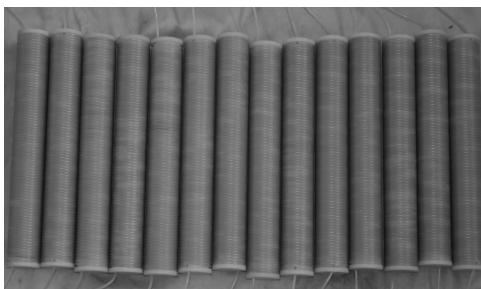


Fig. 1 Rod-shaped inductors with magnetic core  
图 1 带磁芯的棒状电感

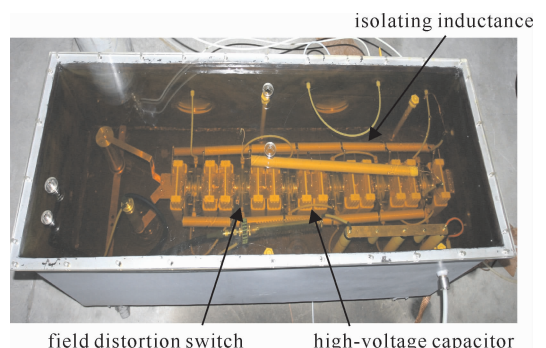


Fig. 2 Layout of the Marx generator in transformer oil tank  
图 2 Marx 发生器在变压器油箱内的结构布局

\* 收稿日期:2008-09-27; 修订日期:2009-01-13

基金项目:国家高技术发展计划项目

作者简介:张晋琪(1979—),女,硕士,从事高功率微波技术研究; zjq2799@163.com。

## 2 开关腔体静电场分析

Marx 发生器中导通开关是整个系统的关键性部件。本文采用带中间圆盘的场畸变开关,电极形状为半球削顶,电极头直径为 30 mm,其圆滑过渡的平面直径为 14 mm,间距为 8 mm;触发圆盘处在两电极间的对称平面上,其中心开孔直径为 18 mm。为了进一步优化开关结构设计,本文通过有限元数值方法对场畸变开关腔体内静电场进行了分析计算<sup>[3]</sup>,图 3 为场畸变开关腔体内静电场分布,正负电极上所施电压 ±50 kV,当中心开孔的触发圆盘上外施触发电压为开关间隙电压的 60%~70%时,开关腔内电场发生严重畸变,激化最大场强均匀分布于半球削顶圆滑过渡 A 区域和相对应的触发圆盘的中心圆孔 B 边缘,类似环形多通道击穿开关,可以减小开关导通时间及开关电感,以获得短的发生器建立时间和小的建立时间抖动。本文设计的场畸变开关采用固定尺寸的放电间隙,击穿电压范围用改变气体压力的方法调节。腔体内充  $p=0.15$  MPa 的  $\text{SF}_6$  气体,从图 3 中可以看出,开关电极底部、绝缘壳体及  $\text{SF}_6$  三种介质交界 C 处场增强,分界面不影响击穿过程本身而仅影响它的边界条件(场强分布、初始电子数和电子损失)。工程条件下分界面闪络场强半经验计算公式<sup>[4]</sup>为

$$E_{\text{dis}} = (E_{\text{dt}}/p) * (10\rho)^c \quad (1)$$

式中:  $E_{\text{dis}}$  为分界面沿面闪络发生的电场强度阈值;  $p$  为气压 (MPa);  $E_{\text{dt}}$  为工程耐电场度 (kV/cm); 常数  $(E_{\text{dt}}/p) *$  和指数  $c$  根据开关外施电压类型修正为:  $(E_{\text{dt}}/p) * = 56 \text{ kV}/(\text{cm} \cdot \text{MPa})$ ,  $c=0.65$ , 公式适用于  $0.05 \text{ MPa} \leq p \leq 0.60 \text{ MPa}$ , 故腔体内充 0.15 MPa 的  $\text{SF}_6$  气体时,  $E_{\text{dis}} \approx 72.9 \text{ kV}/\text{cm}$ 。可通过选用电介质常数较小的材料来降低三介质交界处场增强效应,设计选用有机玻璃(介电常数  $\epsilon_r \approx 2.3$ )作为开关绝缘壳体,使交界处的电场强度降低到 66.3 kV/cm, 小于沿面闪络场强阈值,满足开关腔体的绝缘设计要求。

## 3 工作过程分析

全电感隔离型 Marx 发生器工作原理如图 4 所示,正负双边充电方式<sup>[5]</sup>减少了开关数目,只需 6 个场畸变开关,发生器级数  $n=12$ ,每级电容量  $C_0=12.5 \text{ nF}$ ,充电电压  $|U_0|=5\sim 50 \text{ kV}$  连续可调。

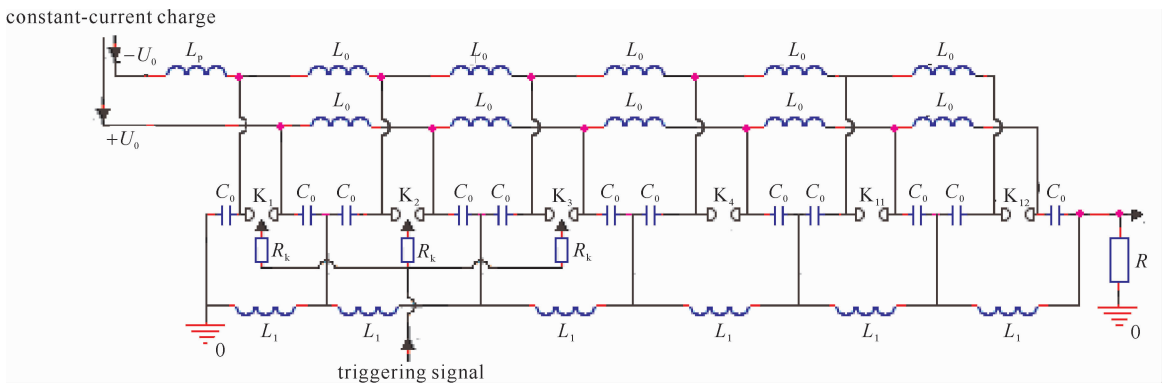


Fig. 4 Principle circuit of Marx generator

图 4 Marx 发生器的原理图

电容器并联充电过程采用大功率高压恒流充电电源。由于功率较大,需采用 4 路(2 正 2 负)相同单元电路同时充电,而每路均通过固定脉冲宽度、固定开关频率,且“零电流”开关的串联谐振逆变器实现恒流输出能力。在控制方式上采用主从式控制模式,即控制单元在充电至设定值前 0.5 ms 先关断两路充电,剩下 2 路至充电结束,这种方式提高了充电精度,增加了各级回路充电的均匀性。

高压恒流充电电源输出电流  $I=2 \text{ A}$ ,发生器充电等效并联电容  $C_0=12.5 \text{ nF} \times 6=75 \text{ nF}$ ,充电时间的理论计算公式为

$$T_c = C_0 U_0 / I \quad (2)$$

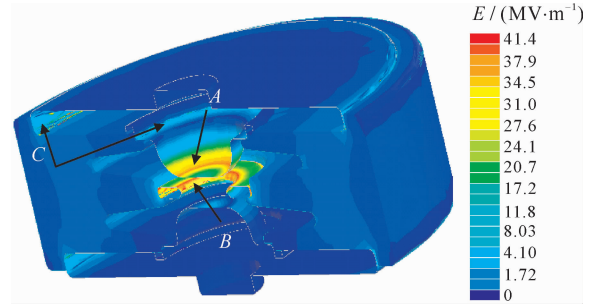


Fig. 3 Electric field distribution on switch cavity while charging

图 3 外施触发电压下开关腔体内静电场分布

由此可见,充电时间  $T_c$  仅与充电等效并联电容和充电电压的乘积  $C_\theta U_0$  有关。由于采用恒流充电,充电回路电流变化率  $di/dt$  比较小,充电过程中充电电感  $L_0$  近似于短路,且充电效率  $\eta_c \approx 100\%$ 。既然充电电感  $L_0$  大小并不影响充电时间及充电效率,那么可以适当增大隔离电感  $L_0$  (放电回路中  $L_0$  即为隔离电感),使发生器的建立时间  $t_s$  和输出脉宽  $t_p$  之和远小于  $L_0 C_0$  回路振荡周期的  $1/4$ ,即  $t_s + t_p \ll \pi \sqrt{L_0 C_0} / 2$ ,这样既可减小旁路放电损失的能量,又可以增加开关间隙过电压的持续时间,有利于开关击穿动作,能改善发生器的同步性能。原理图中  $L_p$  为充电保护电感,由于采用恒流充电,电感  $L_p$  并不影响充电性能,在充电结束后,开关间隙  $K_1$  瞬间击穿时,电感  $L_p$  的引入避免了充电脉冲正负信号瞬间短接,起到了隔离保护充电恒流源的作用。通过高压探头(分压比 5 000)测试出正负同时充电波形如图 5 所示,从图中可读出:电容器充电电压  $U_0 \approx 50$  kV 时,充电时间  $T_c \approx 1.98$  ms,与理论计算值相当接近。

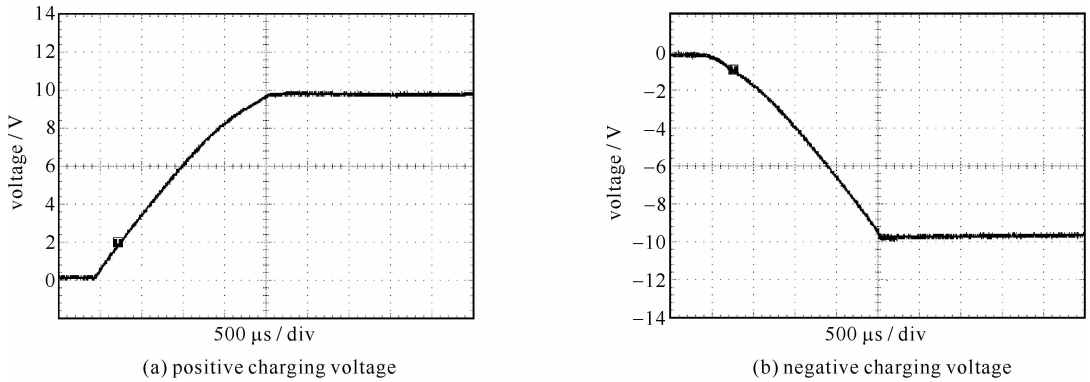


Fig. 5 Charging waveform of Marx generator

图 5 正负同时充电波形

恒流充电电源给电容器并联充电到设定电压值后,送出一路延时可调的同步信号(最大延时为 5 ms,脉宽 10  $\mu$ s)给触发脉冲源的外控制系统,启动其产生一定峰值的尖脉冲信号,然后经触发电阻  $R_k$  并联输入发生器前 3 个开关( $K_1, K_2$  和  $K_3$ )的触发电极,使带中间圆盘的场畸变开关发生严重场畸变,促使开关迅速导通,其余两电极开关则由过压击穿,实现电容串联放电产生高压冲击脉冲,发生器的工作频率由恒流充电电源进行控制。

### 4 实验结果

由于采用固定尺寸的放电间隙,当电容器充电电压升高时,需增大开关充气压力或充高绝缘强度的气体,以提高间隙击穿电压。由于高压下开关击穿不稳定性增强,实验中开关腔体内采用充纯净低气压  $SF_6$  气体;为实现开关同步导通,还需要加大触发脉冲的幅值,同时减小触发脉冲前沿<sup>[6]</sup>。实验中在触发源输出端连接锐化开关<sup>[7]</sup>,压缩触发脉冲前沿小于 100 ns,这样可以缩短开关导通时间,减小火花间隙放电的分散性,从而改善了开关击穿特性和同步性能,提高了电压传输效率。

图 6 为发生器的充电电压  $|U_0| = 46.8$  kV、开关气压  $p_{SF_6} = 0.15$  MPa、触发脉冲峰值 60 kV 状态下所测实验波形,其中,波形 1 为第 1 个开关  $K_1$  触发电极上所测触发波形,波形 2 为通过电阻分压器所测 12 级 Marx 发生器的输出电压波形。发生器建立时间定义为:从第 1 个触发间隙开关被触发电点火到全部场畸变开关击穿

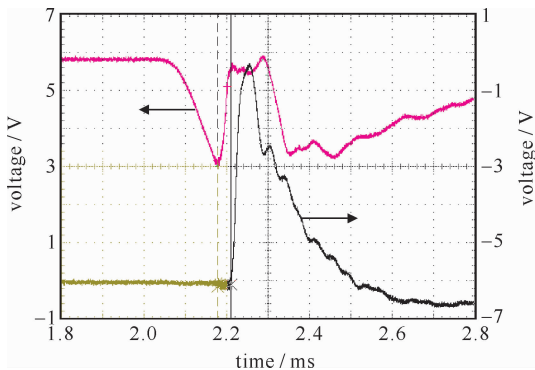


Fig. 6 Output voltage waveform

图 6 输出电压波形

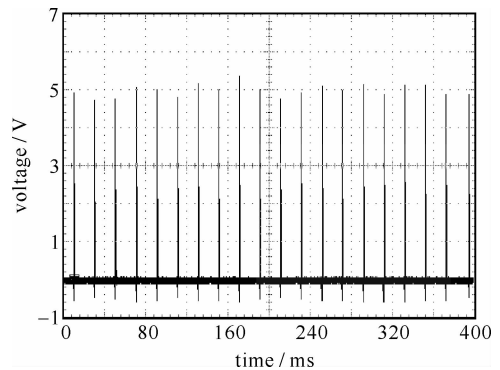


Fig. 7 Test waveform of repeat frequency

图 7 重复频率测试波形

输出高压脉冲所需的时间,图中测试结果显示:输出脉冲电压波形前沿  $\tau_r \approx 40 \text{ ns}$  (10%~90%),发生器建立时间约 32 ns;开关腔内充纯净  $\text{SF}_6$  气体,发生器可以在重复频率 1~50 Hz 下稳定运行。发生器运行在重复频率 50 Hz 下测试波形如图 7 所示。经计算,12 级 Marx 发生器的标称输出电压  $U_m = 12|U_0| = 561.6 \text{ kV}$ ,而实际输出电压  $U_L = 532 \text{ kV}$  (取多次测量的平均值  $\times$  电阻分压器分压倍数  $m \approx 920$  倍  $\times 40 \text{ dB}$  衰减器衰减倍数),则电压传输效率  $\eta > 90\%$ 。

## 5 结 论

研制的 12 级全电感隔离型重复频率 Marx 发生器结构简单、紧凑。开关设计中,选用介电常数为 2.3 的有机玻璃作为开关绝缘壳体,使三介质交界处的电场强度降低到 66.3 kV/cm,小于沿面闪络场强阈值,满足了开关腔体的绝缘设计要求。采用正负双边恒流充电方式,减小了开关数目,缩短了充电时间,实现了 Marx 发生器重复频率 50 Hz 稳定运行。利用带磁芯的棒状电感隔离,减小了电感体积,增大了电感值,从而提高了 Marx 发生器电压传输效率(大于 90%)。通过对充放电过程分析和实验研究得出:Marx 发生器输出电压 532 kV,脉冲前沿约 40 ns,建立时间约 32 ns。

## 参考文献:

- [1] Prather W D, Baum C E, Torres R J, et al. Survey of worldwide high-power wideband capabilities[J]. *IEEE Trans on Elec-mag Comp*, 2004, **46**(3):335-344.
- [2] Mayes J R, Mayes M G, Lara M B. A compact MV Marx generator[C]//Proc of 15<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference. 2004: 326-328.
- [3] 李泉凤. 电磁场数值计算与电磁铁设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2002. (Li Quanfeng. Numerical computation of electromagnetic field and electromagnet design. Beijing: Tsinghua University Press, 2002)
- [4] 莫尔施,豪席尔德. 高压绝缘用六氟化硫[M]. 北京:机械工业出版社, 1984. (Mosch V W, Hauschild W B. High voltage insulation technology using sulfur hexafluoride gas. Beijing: China Machine Press, 1984)
- [5] 王新新,张卓,肖如泉. 重复频率 Marx 发生器的充电回路[J]. 高电压技术, 1997, **23**(1):37-39. (Wang Xinxin, Zhang Zhuo, Xiao Ruquan. The charging circuit of a repetitive Marx generator. *High Voltage Engineering*, 1997, **23**(1):37-39)
- [6] Veron L, Brion J C. Experimental study of a repetitive Marx generator[C]//Proc of 14<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference. 2003:1054-1056.
- [7] Mayes J R, Carey W J, Nunnally W C, et al. The Marx generator as an ultra wideband source[C]//Proc of 13<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference. 2002:1665-1668.

## Repetitive Marx generator with inductive isolators

Zhang Jinqi, Zhang Xianfu, Yang Zhoubing, Xu Gang, Lu Wei

(Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1015, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** This paper discusses the design feature of the repetitive Marx generator, and presents the electrostatic field in switch cavity. Based on the theoretic analysis and experimental research, a 12 stage repetitive Marx generator with inductive isolators has been developed recently, it is charged synchronously with positive and negative constant current. Elements of the Marx generator were compactly arranged to attain lower circuit inductance. Experiments show 532 kV output peak voltage with rise-time about 40 ns and the generator's set-up time is about 32 ns. Filled with pure  $\text{SF}_6$  gas in switch cavity, the Marx generator works stably in the repetitive frequency of 1~50 Hz.

**Key words:** Marx generator; constant-current charge; inductive isolators; compact structure; repetitive frequency