

基于磁开关的全固态、高功率、长脉冲发生器的初步研究*

杨实¹⁾ 杨汉武 钱宝良 钟辉煌

(国防科技大学光电科学与工程学院 长沙 410073)

摘要 大多数电容储能型脉冲功率装置的共同特点是采用了气体开关, 由于气体绝缘恢复的限制和电极的烧蚀, 使得其重复频率都不太高, 而且寿命有限. 而目前广泛研究的磁脉冲压缩技术在脉冲功率系统的长寿命、高平均功率和高重复频率运行方面具有很大的应用前景. 通过对BOOST电路、LC谐振电路和磁脉冲压缩电路详细的理论分析和计算机模拟, 设计了由BOOST电路, LC谐振电路, 脉冲变压器, 磁压缩系统, 负载五大部分组成的脉冲发生器电路系统模型, 使用Pspice软件对系统进行了模拟、优化, 得到了电压幅值为55kV, 脉宽为500ns的输出脉冲.

关键词 磁开关 全固态 脉冲发生器

1 引言

近年来, 随着脉冲功率源向着小型化, 高重复频率运行等方面的发展, 全固态开关在脉冲功率领域的应用得到了广泛的研究. 磁开关作为一种开关恢复时间短、可靠性高、寿命长、可高重复运行以及无消电离和开关烧蚀问题的全固态开关, 具有很大应用前景.

磁脉冲压缩技术最早是由英国学者W.S.Melville提出的. 他从“电感饱和后阻抗迅速下降”这一现象中得到启示, 指出可以利用可饱和电感制成控制能量流动方向的“磁开关”, 利用它将脉宽较大的电流脉冲压缩成为具有窄脉宽、陡化前沿且能量更加集中的脉冲^[1-4].

本文将着重介绍基于磁开关的全固态、高功率、长脉冲发生器电路的设计, 参数的计算和系统的模拟与优化.

2 脉冲发生器的电路结构和工作原理

该脉冲发生器为全固态、高功率、长脉冲发生器, 其电路结构共分为BOOST电路, LC谐振电路, 脉冲变压器, 磁压缩系统, 负载五大部分.

其工作原理为: 市电经三相半控晶闸管(SCR)桥式整流变成约500V的直流, 通过BOOST电路升压到

约2500V. 再通过LC谐振电路使变压器原边的放电电容充电至约4500V. 通过脉冲变压器泵升至约90kV, 输入磁脉冲压缩网络, 最终向负载输出一个电压幅值约55kV, 脉宽约500ns的长脉冲.

3 主要电路的工作原理和参数计算

3.1 BOOST 电路

BOOST电路即升压斩波电路, 如图1所示. 首先假设电路中的电感 L_1 和电容 C_b 都很大. 当开关 S_1 处于导通时, 电源 V_1 向 L_1 充电, 充电电流基本恒定为 I_1 , 同时电容 C_b 上的电压向负载 R_1 供电, 因 C_b 值很大, 基本保持输出电压为恒值, 记为 U_0 . 设 S_1 处于通态的时间为 t_{on} , 此阶段电感 L_1 上积蓄的能量为 $E I_1 t_{on}$. 当 S_1 处于关断时, V_1 和 L_1 共同向电容 C_b 充电, 并向负载 R_1 提供能量. 设 S_1 处于断态的时间为 t_{off} , 则在此期间电感 L_1 释放的能量为 $(U_0 - E) I_1 t_{off}$. 当电路工作于稳态时, 一个周期 T 中电感 L 积蓄的能量与释放的能量相等, 即

$$E I_1 t_{on} = (U_0 - E) I_1 t_{off},$$

化简得

$$U_0 = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} E = \frac{T}{t_{off}} E.$$

2008 - 01 - 07 收稿

* 国家高技术项目基金资助

1) E-mail: ys5552000@gmail.com

式中 $\frac{T}{t_{\text{off}}} \geq 1$, 输出电压高于电源电压. 此处 $\frac{T}{t_{\text{off}}}$ 表示升压比, 调节其大小, 即可改变输出电压 U_0 的大小^[5, 6]. 通过计算及软件的模拟优化, 得到了较好的波形, 如图2所示.

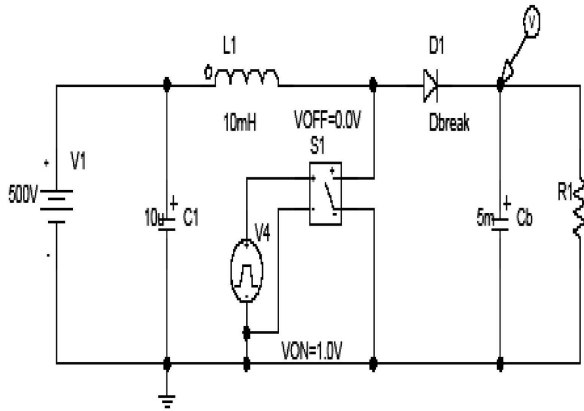


图1 BOOST 电路图

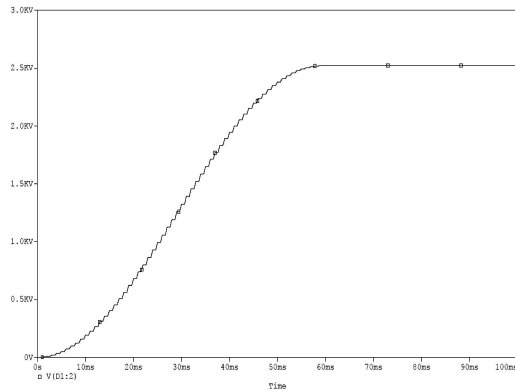


图2 BOOST 电路波形图

3.2 LC 谐振电路

当电容 C_b 上电压达到预期值时, 开关导通开始对 C_0 谐振充电. 可得 C_0 上电压为

$$U_0 = -U_b \frac{C_b}{C_b + C_0} (1 - \cos \omega_1 t), \quad (1)$$

其中 $\omega_1 = \sqrt{(C_b + C_0) / (C_b \cdot C_0 \cdot (L_1 + L_2))}$, 由于 $C_b \gg C_0$, 则从(1)式可以看出, C_0 可以谐振充电至约 U_b 两倍的电压. 通过 Pspice 模拟, 电容 C_b 通过该电路给变压器原边电容 C_0 充电至 4.5kV.

3.3 磁脉冲压缩电路^[7-10]

磁脉冲压缩电路主要由磁开关和电容器组成, 如图3所示. 图中, MS_1, MS_2 为磁开关, C_1, C_2 为电容, 它们的电容值相等, 均为 C , 电容 C_1 的初始电压为 U_0 .

磁脉冲压缩器的工作原理如下: $t = 0$ 时刻闭合开关 S_0 , 储能电容 C_0 通过电感 L_0 向电容 C_1 谐振充电, 充电过程中, 磁开关 MS_1 处于非饱和状态, 其电感值 0 远大于 L_0 , 通过磁开关 MS_1 向电容 C_2 泄漏的电流

可以忽略, 这样, 网孔0周围元件所组成的回路与其他部分相对独立, 其谐振脉宽仅由 C_0, C_1 和 L_0 来决定. 当电容 C_1 的电压达到最大或规定值时, 使 MS_1 正好饱和, C_1 通过 MS_1 向 C_2 谐振充电, 选取 MS_1 的饱和电感值远小于 MS_2 的非饱和电感值和 L_0 的电感值, 网孔1的谐振周期将由 C_1, C_2 和 MS_1 的饱和电感值来决定. 由于网孔1的放电时间常数小于网孔0的放电时间常数, 即电流脉冲得到了压缩. 同样, 经过网孔2, 脉冲宽度会进一步得到压缩, 在负载上得到窄的脉冲输出, 如图4所示.

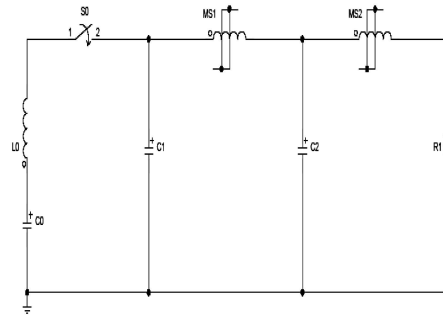


图3 磁脉冲压缩器电路图

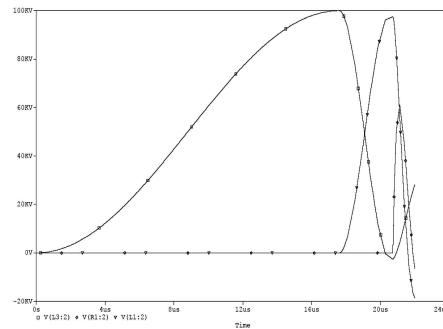


图4 磁脉冲压缩器输出波形图

4 全系统模拟

将优化后的各个部分整合, 进行全系统的模拟, 图5, 6为全系统的电路图和波形图. 从波形图中可以看出, C_1 上的电压为 -88kV , $17.6\mu\text{s}$, C_2 上的电压为 -81kV , $2.93\mu\text{s}$, R 上的电压为 -55kV , 503ns , 脉冲得到了明显的压缩, 并得到了期望的高电压长脉冲.

5 结论

本文对基于磁开关的全固态脉冲发生器的电路结构和工作原理进行了介绍, 并用 PSpice 软件进行了电路模拟, 得到了电压幅值为 55kV , 脉宽为 500ns 的输出脉冲. 为今后进行重复频率和实验研究奠定了坚实的基础.

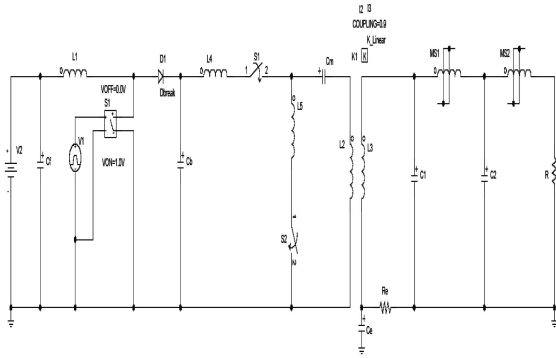


图 5 全系统电路图

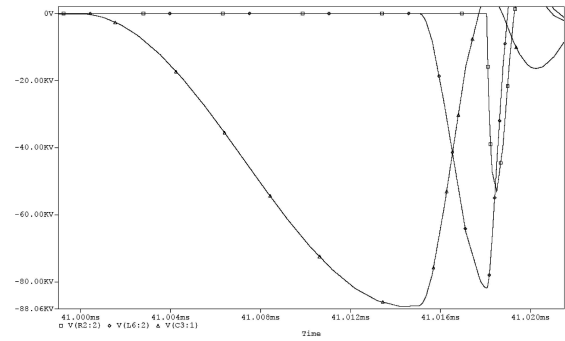


图 6 全系统电路波形图

参考文献(References)

- LIU Xi-San. High Pulsed Power Technology [M], Beijing: National Defense Industry Press, 2005. 380—401 (in Chinese)
(刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. 380—401)
- DAI Yu-Ming, QIAN Zhao-Ming. Power Electronics, 1999, **2**: 54—57 (in Chinese)
(戴育航, 钱照明. 电力电子技术, 1999, **2**: 54—57)
- Melville W S. The Use of Saturable Reactors as Discharge Device for Pulse Generators[J], Proc. Institution of Electrical Engineers, 1951, **98**(3): 185—207
- WANG You-Qing, HUANG Xin-Ming, LI Zai-Guang. Applied Laser, 1995, **15**(5): 215—218 (in Chinese)
(王又青, 黄欣明, 李再光. 应用激光, 1995, **15**(5): 215—218)
- Muhammad H. Rashid. Power Electronics Handbook[M], Beijing: China Machine Press, 2004. 179—187 (in Chinese)
(Muhammad H. Rashid, 陈建业等译. 电力电子技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004. 179—187)
- WANG Zhao-An, HUANG Jun. Power Electronic Technology[M], Beijing: China Machine Press, 2000. 100—108 (in Chinese)
(王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 100—108)
- Nunnally W C. Magnetic Switch and Circuit, Los Alamos[R], 1983. 1—37
- Cook E G, Ball D G, Birx D L et al. High Average Power Magnetic Modulator for Copper Lasers[C], Proceedings of the Eighth IEEE International Pulsed Power Conference, 1991. 537—542
- Barrett D M. Parameters Which Influence the Performance of Practical Magnetic Switch[A], Proc of 10th IEEE Int. Pulsed Power Conf[C], 1995. 1154—1159
- SU Jian-Cang, DING Zhen-Jie, DING Yong-Zhong et al. High Power Laser and Particle Beams, 2004, **16**(10): 1337—1441 (in Chinese)
(苏建仓, 丁臻捷, 丁永忠等. 强激光与粒子束, 2004, **16**(10): 1337—1441)

Preliminary Study of the All-Solid, High-Power, Long-Pulse Pulse Generator Based on Magnetic Switch*

YANG Shi¹⁾ YANG Han-Wu QIAN Bao-Liang ZHONG Hui-Huang

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract The common characteristics of most capacitive energy storage systems are the use of gas switch, while the limitation of the recovery of gas switch and ablation of electrode lead to low repetition rates and short life. The widely researched technology of magnetic pulse compression has great perspective in long life, high average power and high repetition rates in the pulsed power system. Through the theoretical analysis and simulation of the parameters of the BOOST circuit, the LC circuit and magnetic compression circuit, the pulse generator circuit based on the BOOST circuit, the LC circuit, the pulsed transformer and the magnetic switch is designed, simulated and optimized by Pspice. The output pulse has 55kV voltage and 500ns pulse-width.

Key words magnetic switch, all-solid, pulse generator

Received 7 January 2008

* Supported by National High Technology Research and Development Program of China

1) E-mail: ys5552000@gmail.com