

文章编号:1001-2486(2005)04-0037-04

## 新型爆磁压缩脉冲功率调制电路\*

杨汉武, 钟辉煌, 张建德

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**爆磁压缩发生器一般具有较低阻抗,在驱动较高阻抗负载时需要脉冲功率调制电路。传统的脉冲功率调制电路需要脉冲变压器,体积庞大,若其后再采用传输线作中间电容储能,尽管输出波形有改善,但体积更大。提出一种无需脉冲变压器,把传输线当作电感储能元件的功率调制电路。该方案具有电路结构简单、体积紧凑、绝缘压力小等优点。文中同时给出了电路的仿真结果。该功率调制方案将使爆磁压缩的应用更加广泛。

**关键词:**爆磁压缩;电感储能;脉冲形成线;切断开关;脉冲功率调制

**中图分类号:**TN015 **文献标识码:**A

## A Novel Power Conditioning Circuit for Flux Compression Generators

YANG Han-wu, ZHONG Hui-huang, ZHANG Jian-de

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

**Abstract:** A novel power conditioning circuit for flux compression generators (FCG) to drive high impedance loads is presented. FCG usually has very low impedance, and power conditioning is necessary with high impedance loads. The traditional power conditioning scheme uses a pulse transformer and sometimes an additional capacitive pulse forming line (PFL) to improve the output waveform, making the system bulky. The paper introduces a circuit without transformers, using PFL as an inductive energy storage unit. This scheme has the advantages of simplicity, compactness, and easy insulation. Numerical simulation is shown to prove the concept. By using this circuit FCG will have wider applications.

**Key words:** flux compression; inductive storage; pulse forming; opening switch; power conditioning

爆磁压缩发生器(FCG)是一种紧凑的脉冲功率驱动源<sup>[1]</sup>,它利用炸药的化学能做功,具有很高的储能密度,比电容器储能密度高几个量级。但爆磁压缩发生器的阻抗一般很低,小于 $1\Omega$ ,这使得它可以输出可达 MA 量级的电流,但输出电压较低。由于爆磁压缩发生器的体积小,并且自备能源,这使得它的应用潜力很大,如驱动高功率微波<sup>[2]</sup>(HPM)。但一般的 HPM 发生器具有较高阻抗,如果直接采用 FCG 驱动,能量效率很低。所以驱动高阻抗负载,脉冲功率调制电路是必不可少的。目前的脉冲功率调制电路一般需要脉冲变压器<sup>[3]</sup>,甚至需要中间储能传输线,为了绝缘考虑,体积比较庞大,这些因素限制了 FCG 的广泛应用。

### 1 传统的脉冲功率调制电路

脉冲功率调制电路就是把 FCG 产生的低电压( $\sim 10\text{kV}$ )、长脉冲( $\sim 10\mu\text{s}$ )、大电流( $\sim 100\text{kA}$ )的脉冲调制成高电压( $\sim 500\text{kV}$ )、短脉冲( $\sim 100\text{ns}$ )、较小电流( $\sim 10\text{kA}$ )的脉冲,以便驱动高阻抗负载。如图 1 所示,传统的脉冲功率调制电路有两种,上图使用脉冲变压器结合电爆炸丝切断开关,下图使用脉冲变压器结合中间电容储能传输线<sup>[4]</sup>。图中  $L_{\text{FCG}}$  模拟 FCG 的电感变化,  $R_{\text{FCG}}$  模拟 FCG 的电阻变化, XForm 为脉冲变压器, EEOS1 为电爆炸丝切断开关, PFL1 为 Blumlein 脉冲形成线, Vircator 为二极管负载。

脉冲变压器的主要用途是提高电压和阻抗匹配。切断开关的主要用途是进一步提升电压和减小电

\* 收稿日期:2005-03-16

作者简介:杨汉武(1974—),男,讲师,博士。

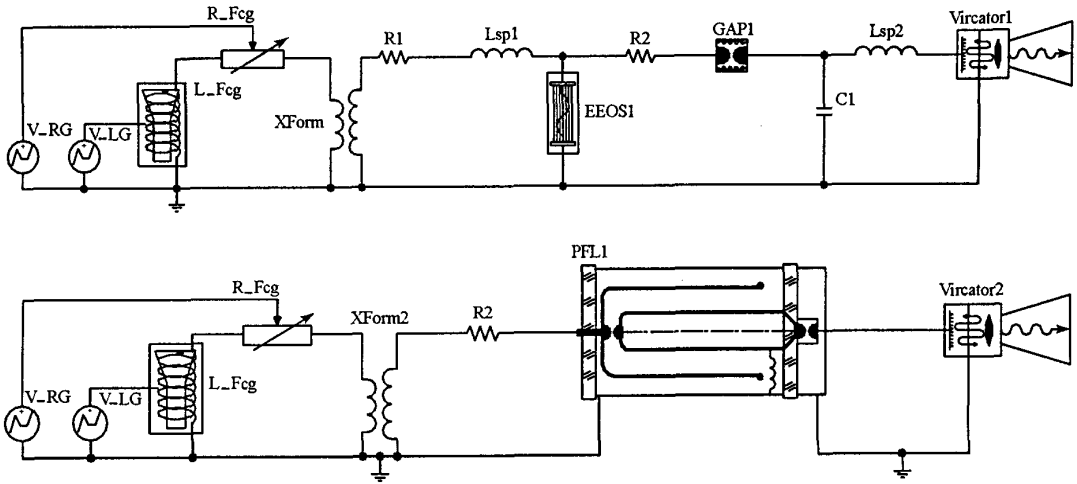


图1 FCG驱动高功率微波源的两脉冲功率调制方案<sup>[4]</sup>

Fig.1 Schematic of two power conditioning schemes for FCG driven HPM sources<sup>[4]</sup>

压的上升前沿,目前使用较多的是电爆炸丝切断开关,形成的脉冲波形上升速度不够快,且缺乏平顶。不采用切断开关而使用脉冲形成线,可使输出的波形具有方波特征,与负载更容易匹配。但由于电容储能密度比电感储能密度低,于是体积和重量劣于使用切断开关的方案。由于爆磁压缩的运行时间一般在  $10\mu s$  以上,这样在变压器的副边电压比较高的时间较长,为了绝缘考虑,两种方案都很难再进一步实现体积紧凑。由于这种限制,使得 FCG 从 20 世纪 50 年代以来多用在低阻抗负载上,其体积紧凑、储能密度高的优势没有充分发挥出来。

## 2 电感储能的传输线

电感储能密度通常比电容储能密度高出许多,但电感储能需要切断开关,一般在负载上很难得到理想的方波波形,而基于电容储能的传输线却能产生方波脉冲。如果能够将电感储能和脉冲形成线的优势结合起来,则既可以实现体积紧凑,又能在负载上获得较好的波形。电感储能的传输线恰好具备这个特点。

通常脉冲形成线的用法是以较慢的速度充电,然后快速闭合开关,在负载上形成方波脉冲<sup>[5]</sup>。根据脉冲绝缘的 Martin 公式,时间越长,击穿场强越低,这样传输线的绝缘就成为需要考虑的问题。但传输线理论上可以应用于电感储能,就是在传输线上先通过较大的电流,能量储存在磁场中,然后切断开关工作,传输线中储存的能量向负载释放。这样传输线在电流上升期间,不需承受很高的电压,仅在 ns 级的放电时间内承受电压,于是耐压问题不复存在,这样传输线的理论储能可以比电容储能高出几个数量级。图 2 给出了电感储能的传输线的电路原理图。

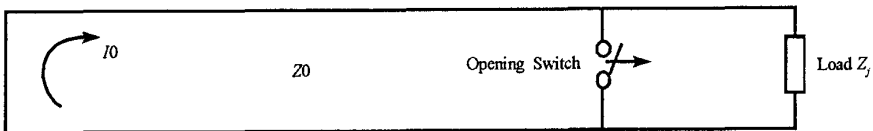


图2 电感储能的传输线

Fig.2 An inductive transmission line

由于大电流的获得相对困难,所以基于传输线电感储能的应用非常少见。Rhee 等在 1990 年总结了传输线的这种用途<sup>[6]</sup>和理论,又在 1993 年采用这种基于电感储能的传输线和半导体开关获得了方波输出<sup>[7]</sup>,但并未引起足够的重视。

### 3 电感储能传输线作为 FCG 调制电路

笔者认为,传输线的电感储能实际上是将最初的大电流磁场储能在切断开关工作后以较小电流向负载释放,这种应用不合常规,故而未得到推广。但目前 FCG 驱动高阻抗负载的应用恰好适应电感储能的传输线,并且二者的配合具有先天的优势:(1)都是基于电感储能,储能密度高,体积紧凑,重量轻;(2)FCG 是低阻抗、大电流发生器,而传输线充电期间相当于短路,其阻抗极低,能做到与 FCG 的良好匹配;(3)切断开关工作以后,传输线向负载放电,这时 FCG 与传输线电路断开,传输线的特性阻抗使其可以很容易做到与负载匹配,从而解决了低阻抗 FCG 驱动高阻抗负载的问题。

图 3 给出了 FCG 和电感储能传输线的应用电路,图中 FCG1 模拟 FCG 的电感变化<sup>[4]</sup>,V1 给出电感随时间变化的规律。 $R_1$  为回路的等效电阻, $U_1$  是切断开关,TL 为传输线,其右端短路。Viricator2 是二极管负载, $L_2$ 、 $L_4$ 、 $L_5$  为回路的杂散电感。

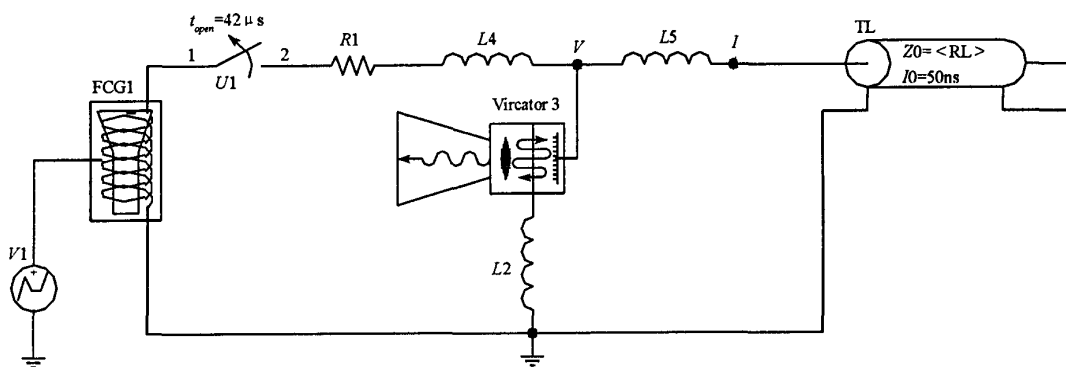


图 3 FCG 和电感储能传输线的应用电路

Fig.3 Circuit of FCG working with a current-fed transmission line

电路的工作过程是:首先开关  $U_1$  是闭合的,这时 FCG 运行,其输出电流通过  $R_1$ 、 $L_4$ 、 $L_5$  和传输线形成回路,由于传输线是短路的,传输线上电压可以忽略,且没有电流通过负载二极管。当 FCG 输出的电流达到最大时,传输线上的电感储能也达到最大,这时开关  $U_1$  迅速断开,流过传输线的电流被迫通过负载形成回路,这样就在负载上产生了高压方波脉冲。

### 4 电路数值计算结果

为验证这一方案的可行性,对上述电路进行了 PSpice 数值模拟。模拟中考虑了杂散电感的影响,但未考虑电阻随时间的变化。使用  $sw\_topen$  元件模拟切断开关,开关动作时间为 100ns。假定在  $42\mu s$  时 FCG 产生了约 100kA 的电流输出,这时开关断开。需要指出,FCG 产生 100kA 是非常容易的,文献[8]在  $4\mu H$  的电感负载上产生了 120kA 的电流输出。传输线特征阻抗为  $15\Omega$ ,单向延时为 50ns,电流最大时传输线电感储能为 3.75kJ。以下分别对  $5\Omega$ 、 $15\Omega$  和  $50\Omega$  三种电阻负载进行了数值计算。

图 4 给出了在负载为  $15\Omega$ ,即与传输线匹配情况下的数值计算结果。可以看出,在电流达到 100kA 时,切断开关动作,流过传输线的电流突然减小,对应地在负载上产生了一个高电压脉冲。

为更仔细研究负载上获得的电压,图 5 在更小的时间尺度上给出了三种负载条件下的负载电压波形。可以看出,波形的平顶性较好,在  $50\Omega$  负载上获得了 1.15MV 的平顶电压, $15\Omega$  负载上 753kV, $5\Omega$  负载上 387kV,脉冲半高宽度都约为 100ns。电压波形的上升速度基本相同,这主要是由切断开关的速度决定的,约 15ns。电压波形的下降沿在负载为  $50\Omega$  时最快, $5\Omega$  最慢,这主要取决于传输线对负载的放电特性。阻抗匹配时负载电压基本上为一方波,能量大部分在第一个放电周期内向负载释放。负载阻抗大于传输线特性阻抗时,波形产生了振荡,这时虽然负载的电压高,但能量未在第一个放电周期内释放完毕,能量效率较低。负载阻抗小于传输线阻抗时,不仅电压较低,能量也未在第一个放电周期内全部

释放。在  $42.1\mu\text{s}$  时,  $5\Omega$ 、 $15\Omega$ 、 $50\Omega$  负载上的电功率分别为  $26.8\text{GW}$ 、 $37.1\text{GW}$  和  $27\text{GW}$ , 在第一个放电周期负载获得的能量分别为  $2.8\text{kJ}$ 、 $3.9\text{kJ}$  和  $2.8\text{kJ}$ 。可见匹配情况下能量效率最高, 这里甚至比传输线储能稍高, 是因为回路的杂散电感储能也释放在负载上。

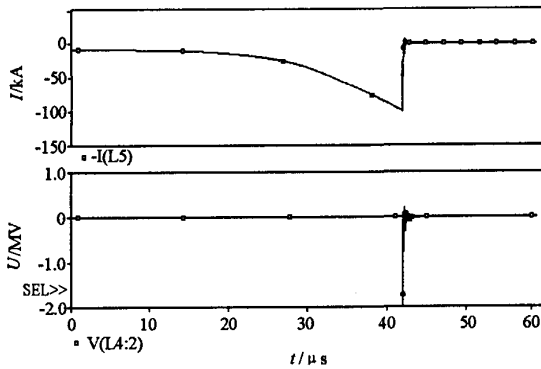


图4 负载  $15\Omega$  时模拟的电流和电压曲线  
Fig.4 Current and voltage results from simulation with load of  $15\Omega$

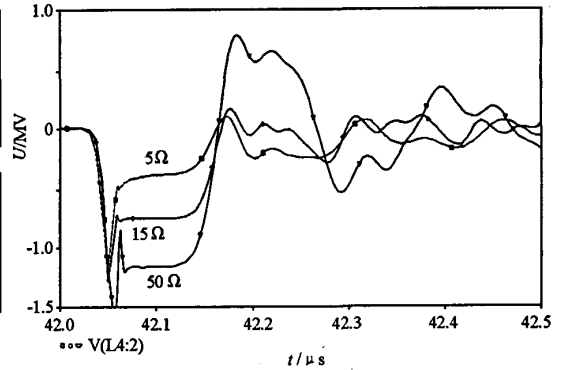


图5 三种不同负载上获得的电压波形  
Fig.5 Voltage waveforms from three different load

以上电压波形在前沿都产生了过冲, 这是由回路的杂散电感  $L_2$  引起的。由于开关动作以前没有电流通过  $L_2$ , 当此回路的电流突然上升时, 在  $L_2$  上感应出很高的电压。这个电压对于二极管负载是没有害处的。

## 5 结论

提出了一种新型的 FCG 脉冲功率调制电路, 它利用电感储能的传输线脉冲形成原理, 电路简单, 储能密度大大提高, 并且充电期间传输线短路, 与 FCG 很好匹配, 且电压极低, 降低了对传输线绝缘的要求, 从而可能做得非常紧凑。由于传输线放电期间与 FCG 隔离, 使得调整传输线的阻抗可以很容易和高阻抗负载匹配。文中对此电路进行了初步的数值模拟分析, 表明了可行性, 目前正在开展初步的实验研究工作。采用这种脉冲功率调制电路, 只要配以高性能切断开关, 就能使这种脉冲功率调制方案的应用更加广泛。

## 参考文献:

- [1] Knoepfel H. Pulsed High Magnetic Fields[M]. North-Holland Publishing Company, 1970.
- [2] Kopp C. The E-Bomb: A Weapon of Electrical Mass Destruction[C]. <http://www.alphalink.com.au/~noelmod/lostlink/ebomb.htm>, 1997.
- [3] Giesselmann M, Heeren T, et al. Experimental and Analytical Investigation of a Pulsed Power Conditioning System for Magnetic Flux Compression Generators[J]. IEEE Trans. Plasma Science. 28, 2000:1368 - 1376.
- [4] 杨汉武. 爆磁压缩发生器及其脉冲功率调制研究[D]. 国防科技大学, 2002.
- [5] Martin J C. Nanosecond Pulse Techniques. Proceedings of IEEE. 1992, 80(6), 934 - 945.
- [6] Rhee M J, Fine T A, Kung C C. Basic Circuits for Inductive-energy Pulsed Power Systems[J]. J. Appl. Phys. 1990, 67(9), 4333 - 4337.
- [7] Rhee M J, Ding B N. Repetitive Square Pulse Generation by Inductive Pulse-forming Lines with a Field Effect Transistor as an Opening Switch[J]. Rev. Sci. Instrum. 1993, 64(4), 1665 - 1666.
- [8] Chen D Q. Cascaded Helical Flux Compression Generator with Battery Initial Source[A]. 10th International Mega Gauss Conference, Berlin, 2004.

