

一种幅频可调的高频高压方波电源的研制

肖宇华¹,陶风波²,周志成²,陈少波²,马勇²,王海威¹

(1.南京供电公司,江苏南京 210008;2.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏南京,211103)

摘要:针对现有气体开关频率低、幅值不易控制的缺点,以固体开关绝缘栅双极型晶体管(IGBT)为主要开关元件,由单片机来控制频率和占空比的调节,通过脉冲变压器升压和整形电路的整形,得到高频高压方波电压。脉冲电压频率可以在 1~15 kHz 之间任意调节,电压幅值可在 0~20 kV 之间连续可调。电源同时具有良好的过压和过流保护作用。

关键词:高频;高压方波;过流保护;过压保护

中图分类号: TM832

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2012)05-0049-04

随着脉冲功率技术的发展,高频高压电源越来越多的用于废水废气的处理、臭氧产生、材料改性及合成之中。如上升沿小于 $1 \mu\text{s}$,脉宽为 $5 \sim 15 \mu\text{s}$,场强为 $10 \sim 50 \text{ kV/cm}$ 的脉冲电场可以用来对液态食品进行灭菌^[1];高压脉冲在水中放电形成的等离子体可以对污水进行处理^[2,3],特别适用于化学方法难以处理的有机物,而且耗能低,不产生二次污染^[4,5]。随着脉冲放电等离子体技术的发展及其广泛应用,脉冲放电现象与放电机理的研究成为当前一个热门的研究话题^[6]。为了深入掌握脉冲放电机理,频率、脉宽、幅值等参数可变的高压高频电源就显得非常必要。随着大功率,耐压高的可控硅器件的出现,高频电源的产生变得比较方便,但受脉冲变压器本身参数的影响,如漏感和杂散电容,输出波形往往包含了大量的振荡,波形极不规则。研制的脉冲电源以绝缘栅双极型晶体管(IGBT)为主要开关元件,通过逆变电路、脉冲变压器和波形调节电路,由单片机输出方波为控制信号,产生连续的频率、幅值可调的方波脉冲,其频率范围为 1~15 kHz,电压幅值为 0~20 kV。

1 IGBT 驱动电路分析

IGBT 器件只需要对栅极输入电容进行充放电就可以使器件开通或关断。但栅极通常遇到电压尖峰、各种寄生振荡,从而损坏 IGBT。为减小这些外界干扰,可在栅极串联 1 个电阻。电阻较小时会使 di/dt 变化率上升,引起误导通,而电阻较大时,开通和关断的时间会增长,开关损耗增大。经调试,在此处串联一 3.1Ω 的电阻。在 G、E 之间串联 2 个反向稳压管,用来限制过冲,防止门极驱动电路出现高压尖峰,保证 IGBT 的基极不被击穿。

驱动芯片采用三菱公司的 M57962L,通过 +15 V 的开通电压和 -9 V 的关断电压控制 IGBT 的通

断。为了有效保护 IGBT 不因长时过流而损坏及稳压管 D3、D1 的值,来设定过流保护裕度。通过监测 UCE 的幅值,由光耦输出过流关断信号控制 IGBT 关断,达到过流保护的目。IGBT 驱动回路如图 1 所示。

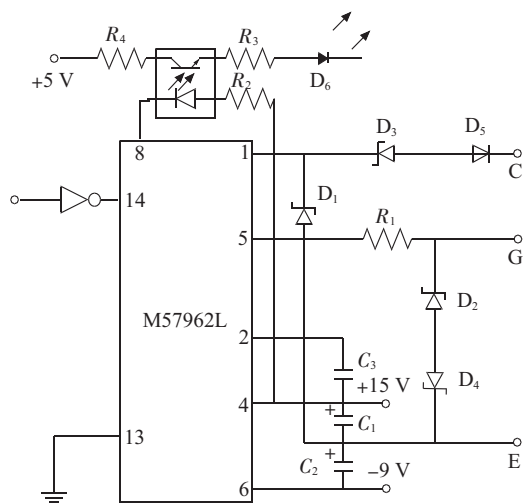


图 1 IGBT 驱动回路示意图

2 主电路回路分析

2.1 交流整流

主回路如图 2 所示,交流整流通过整流桥实现,通过改变整流桥导通角来进行调压。主回路电感 L 值通过实际需要来选择,电感量增大有利于电流的平稳,对于抑制逆变部分电压的过冲有明显作用,但同时增大了电感自身的损耗,使得输出直流电压幅值下降。

2.2 直流逆变

该部分主要由 4 个 IGBT 组成桥式可逆斩波电路^[7,8],每个支路反并联 1 个二极管组成续流通路。晶闸管的缓冲电路和过压保护电路如图 2 所示,在关断时刻,电路绕过 R_X (X 表示缓冲电路各下标)由 D_X 对 C_X 进行充电,这样可以克服充电电流在 R_X 上

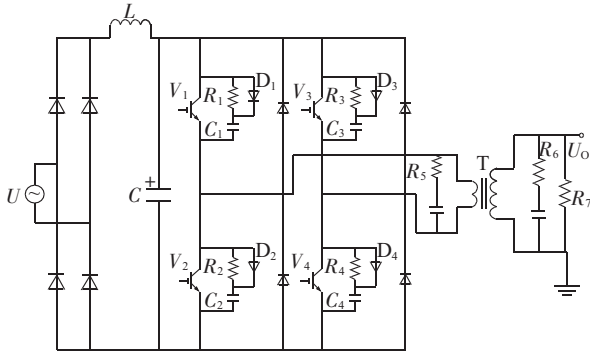


图2 主电路回路示意图

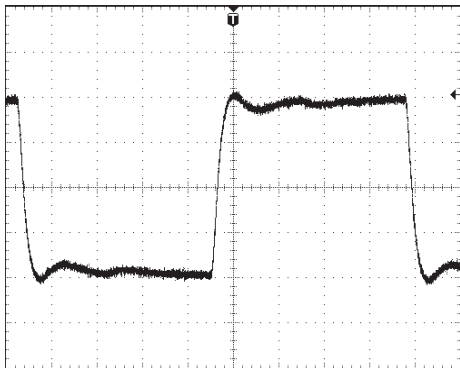
产生的压降而形成过冲。放电时 C_X 通过 R_X 由 IGBT 从主回路放电。吸收电容和电阻的参数选择由下式决定^[9]：

$$C_X = \frac{L_S I_O^2}{(V_{CEP} - E_d)^2} \quad (1)$$

$$R_X \leq \frac{1}{2 \times 3 \times C_X \times f} \quad (2)$$

式中： L_S 为主电路电感； I_O 为 IGBT 关断时集电极电流； V_{CEP} 为缓冲回路电容电压的最终值； E_d 为直流电源电压值； f 为开关频率。

计算时，考虑到阻容放电，开关频率可取实际工作最高频率，使电容上存储的电流能在半个周期内放完。电容不宜取得过大，否则在 IGBT 开通时集电极始终有电容放电电流流过，使得电流增大，IGBT 容易受到损坏。 C_X 的放电是通过缓冲电路中的 R_X 释放到主回路中的，因此， R_X 太小，缓冲回路的电流可能会发生振荡，并且 IGBT 导通时集电极电流峰值也增大； R_X 太大，将增大放电常数，使得 C_X 在 IGBT 导通期间内不能把电放完。该电路中， C_X 的计算值为 $0.0086 \mu\text{F}$ ， R_X 的计算值为 555.6Ω 。经过实际调试， C_X 取为 $0.01 \mu\text{F}$ ， R_X 取为 100Ω 。在原边负载为纯电阻的情况下，逆变电路原边输出实测波形如图 3 所示。



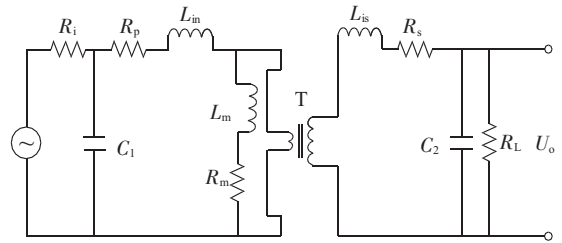
V:50 V/div; H:40 μs /div

图3 原边电压输出波形图

2.3 脉冲变压器升压

脉冲幅值的放大主要由脉冲变压器来完成。对于高频正弦波，脉冲变压器副边输出电压波形基本保持不变，但对于方波来说由于其前后沿包含丰富的高频分量，平顶处近似为直流分量，所以通过电感、电容这些非线性元件后不可避免地会发生畸变，造成波形的振荡。

图 4 为脉冲变压器等效电路^[10,11]，通过把副边电路元件参数折合到原边，并且合并一些参数，图 4 电路可以用图 5 来代替。



R_i 为电源内阻； R_p 为一次侧电感内阻； R_s 为二次侧电感内阻； L_{m1} 和 L_{m2} 为原边和副边的漏感； C_1 和 C_2 为原边和副边的等效电容； R_m 为铁心电阻； L_m 为励磁电感； T 为理想变压器； R_L 为负载

图4 脉冲变压器等效电路

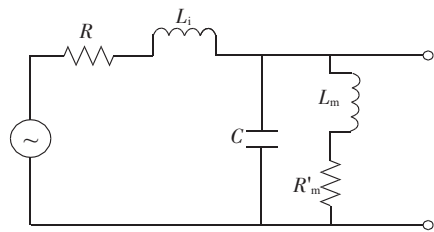


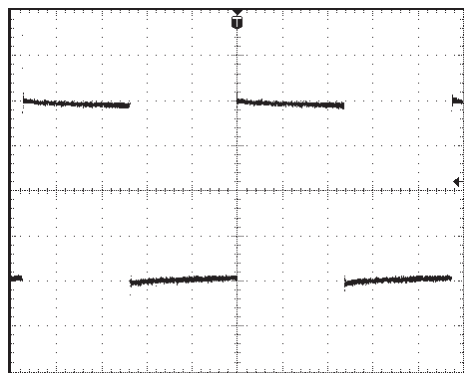
图5 脉冲变压器简化电路

在脉冲的上升沿，由于 L_i 的存在，高频分量将大量消耗在 L_i 上，由此引起输出电压上升沿变缓，产生畸变。在平顶阶段，此时方波频率相当低（近似为直流）， L_i 和 C 的作用可以忽视。此时， L_m 中将积累大量的能量，在下降沿阶段，能量将通过负载而释放，所以输出波形在下降沿会出现过冲。在双极性波形中， L_m 将导致上升沿的最高处和下降沿的最低处出现过冲。同时，如果回路阻尼比较小，波形将出现振荡。图 6 为不加任何调制电路情况下脉冲变压器的输出实测波形。

图 6 中波形的过冲和振荡可通过在原边和副边加阻容回路加以吸收，从而得到较好的消除。而对于平顶下降的问题，可以在副边加一负载，增大放电常数，从而有效减小平顶降。图 7 为加阻容吸收后高压侧输出实测波形。

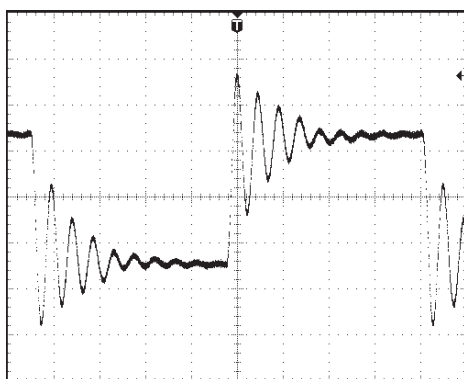
3 波形调试与分析

为了掌握各参数对脉冲变压器输出波形的影



V:1 000 V/div;H:40 μs/div

图6 无波形调节电路时脉冲变压器输出实测波形



V:1 000 V/div;H:40 μs/div

图7 加调波电路后脉冲变压器输出实测波形

响,此处用 PSpice 对脉冲变压器电路进行了定性仿真,电路采用图 5 的结构,各参数取值分别为: $R=20\ \Omega$, $L_i=200\ \mu\text{H}$, $C=15\ \text{nF}$, $L=30\ \text{mH}$, $R_m=10\ \Omega$,脉冲电压值为 $\pm 4\ 000\ \text{V}$,上升时间和下降时间均设置为 $300\ \text{ns}$ 。

由于漏感的存在,方波中大多高频分量降在漏感上,造成方波脉冲上升时间增加。要增大此处高频分量的输出,可以通过减小脉冲变压器的分布电容,如减少一次绕组的匝数。但由漏感和分布电容产生的波形振荡仍然存在。因此要尽量减小变压器的漏感。如取 $L_i=2\ \mu\text{H}$,波形振荡将得到消除,并且上升沿变陡。不同漏感下输出波形如图 8 所示。

实际中,脉冲变压器的漏感和分布电容往往难以得到有效的减小甚至消除,因此,需要借助整形电路对输出脉冲进行整形,该处采用阻容串联结构,利用电容来吸收过冲。电容和电阻选取原则为阻容结构的充/放电常数足够大,使得在脉冲的正半/负半周期内,电容充电曲线在该时间段可近似为一斜率不变的直线,由 $i=C(\text{d}u/\text{d}t)$,此时电流近似为一恒流,因此在电阻上产生的压降也将近似为一恒定值。通过对电容的正反充电,将在电阻上形成

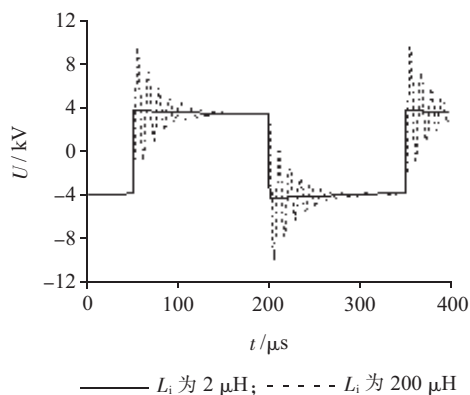


图8 脉冲变压器不同漏感下输出波形

正负脉冲。但此处电容不宜过大,否则会造成单极性电荷大量积聚,从而产生偏压。该处电阻也不宜过大,否则输出波形将出现振荡。电容太小和电阻过大产生的波形分别如图 9 和图 10 所示。

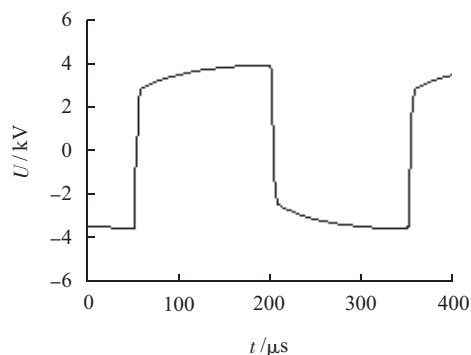


图9 吸收电容过小输出波形

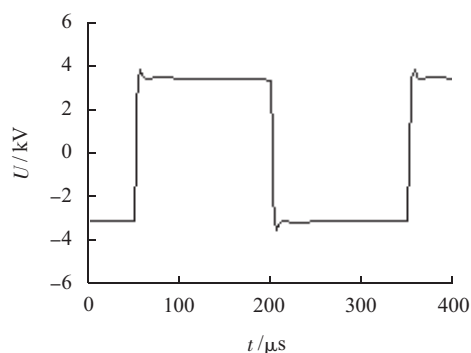


图10 吸收电阻过大输出波形

脉冲变压器输出波形振荡主要来自于变压器的漏感和分布电容,两者决定了振荡频率和输出波形的上升时间。通过选择合适的阻容结构,振荡波形可以得到有效消除。因此,选用漏感和分布电容小的脉冲变压器可以有效提高输出方波上升时间,同时也将降低整形电路的损耗。

4 结束语

该装置可以输出上升沿约 $6\ \mu\text{s}$,频率范围为

1~15 kHz,幅值为0~20 kV,占空比均可调节的双极性脉冲电压。过流保护和过压保护在短路实验中可有效保护 IGBT 不被损坏。选择合适的阻容调制回路可以有效降低输出方波的过冲和平顶降。

参考文献:

- [1] 魏新劳,李家辉,延二宝,等.脉冲电场灭菌机理分析及细菌失活模型的研究[J].电机与控制学报,2011,15(1):6-12.
- [2] 刘克富,赵海洋,邱 剑.快脉冲放电等离子体用于难降解污水处理[J].高电压技术,2009,35(1):12-16.
- [3] 叶齐政,万 辉,雷 燕,等.放电等离子体水处理技术中的若干问题[J].高电压技术,2003,29(4):32-34.
- [4] 陈银生,张新胜,常 胜,等.脉冲放电等离子体降解废水中有机物的作用机理探索[J].环境科学学报,2005,25(1):113-116.
- [5] 沈拥军,储金宇.高压脉冲电晕放电等离子体降解水中苯酚[J].水处理技术,2005,31(3):53-55.
- [6] 邵 涛,袁伟群,孙广生,等.常压下重频纳秒脉冲气体放电试验研究[J].高电压技术,2005,31(8):161-166.
- [7] 王兆安,黄 俊.电力电子技术[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [8] KIM J H, RYU M H, SHENDEREY S, et al. Pulse Power Supply Using an IGBT Switch Stack For Plasma Source Ion Implantation[C]. 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.
- [9] 杨岳峰,张奕黄. IGBT 的瞬态保护和缓冲电路. 电机电器技术,2003(3):10-11.
- [10] 卡姆普曲克 V W, 勒斯 E. 铁氧体磁芯 [M]. 冯怀涵, 沈执良, 池玉清, 译. 北京: 科学出版社, 1986.
- [11] CUK S. A New Zero-ripple Switching DC-to-DC Converter and Integrated Magnetics [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1983, 19(2):57-75.

作者简介

- 肖宇华(1987),男,江苏江阴人,助理工程师,从事用电检查工作;
- 陶风波(1982),男,江苏常州人,工程师,从事高电压技术方面的工作;
- 周志成(1977),男,湖南株洲人,高级工程师,从事高电压技术方面的工作;
- 陈少波(1963),男,浙江宁波人,高级工程师,从事高电压技术方面的工作;
- 马 勇(1986),男,湖北襄樊人,助理工程师,从事高电压技术方面的工作;
- 王海威(1984),男,江苏南京人,助理工程师,从事配电运检工作。

Development of a Kind of adjustable Amplitude-frequency High Frequency High Voltage Square Wave Power

XIAO Yu-hua¹, TAO Feng-bo², ZHOU Zhi-cheng², CHRN Shao-bo², MA Yong², WANG Hai-wei¹

(1. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 21103, China)

Abstract: Solid state switch insulated gate bipolar transistor (IGBT) is made as main switching elements. The frequency and duty cycle are regulated by microcontroller. High frequency and high voltage square wave voltage is achieved by step-up of pulse transformer and shaping of shaping circuit. The shortcomings of low switching frequency and amplitude with difficult coercion which existing gas switch has are overcome. The frequency of pulse voltage can be adjusted between 1~15 kHz. Voltage amplitude can be continuously adjusted between 0~20 kV. Power has good role on overvoltage and overcurrent protection at the same time.

Key words: high frequency; high voltage square wave; overvoltage protection; overcurrent protection

印度大停电

2012年7月30日,印度遭遇大面积停电,逾3.7亿人受到影响。印度北方邦境内的一座超高压变电站出现问题,导致部分输电线路和变电站过负荷,随后发生连锁反应,最终导致北部电网崩溃。

31日,在印度北部恢复供电数小时后,该国东部和北部地区13个邦又陷入电力瘫痪状态,全国近一半地区的供电出现中断,影响约6亿人口用电。

此次大面积停电被认为是印度11年来最严重的停电事故,也有报道称这是全球历来规模最大的停电事故之一。

印度大停电暴露印度电网在网架结构、管理、体制等方面诸多问题。有专家认为,印度在电力基础设施建设方面太薄弱,特别是电力缺口大,而且印度对这方面的重视和人力物力财力的投入相对匮乏。除了技术层面的问题,印度政府在电力方面的管理和调控能力很差,没有能够保障不断电的基本措施和政策。

摘自《国家电力信息网》