

# 并联谐振电路在调制器充电电源中的应用\*

郭亮 尚雷<sup>1)</sup> 刘超

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

**摘要** 文章探讨了一种新颖的并联谐振高压开关电路,该电路无需使用外加谐振元件,只利用变压器的漏感和分布电容作为谐振参数,既减小了变压器寄生参数的影响,也简化电路.设计采用调频器件 CD4046 对 MOS 管进行开关频率控制,且令变换器工作于过谐振模式时,该电路能够体现出对电容恒流充电的特性.文中对电路的工作过程进行了简要分析,并给出了功率计算和实验波形.

**关键词** 并联谐振 过谐振模式 电容充电

## 1 引言

近年来,在射频直线加速器中采用恒流充电逆变开关电源技术替代传统的低频谐振充电技术得到了逐步应用<sup>[1-3]</sup>.和传统技术相比,恒流逆变开关电源具有工作频率高、体积小、效率高、电磁兼容性能好的特点.目前该项技术大多数采用串联谐振拓扑,并且已有的文献也大多是介绍串联谐振电路的<sup>[1-3]</sup>.串联谐振电路虽然具备很多优点,但也有一些不足,如高压变压器的分布电容仍有不利影响<sup>[2]</sup>;小容量负载电容的充电精度问题及直流应用问题等<sup>[3]</sup>.本文尝试了一种新颖的并联谐振开关电路,也能够具备恒流充电的特点及内在过流保护能力,同时具备高的负载调整率.本文通过对 2kJ/s 的并联谐振电路的分析、仿真及实验说明了其原理及特点.并将该电路成功运用于脉冲冲击磁铁调制器中.

## 2 并联谐振主电路分析

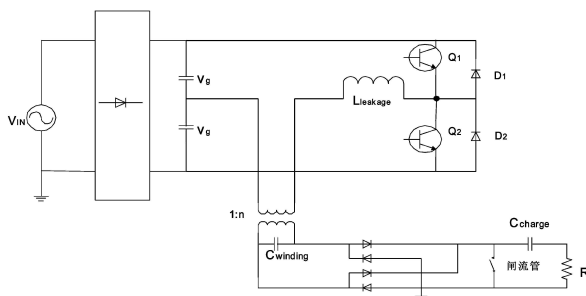


图 1 并联谐振变换器基本电路

图 1 为并联谐振变换器用于电容器充电装置的主电路,采用半桥型拓扑结构.  $V_g$  为整流后直流输入电压的一半分压, Q1, Q2, D1, D2 构成半桥逆变器,  $C_{winding}$  为变压器的分布电容,  $L_{leakage}$  为变压器漏感,高频变压器经过 1:n 的变比将高频低压升为高压经硅堆整流向负载电容充电.

## 3 工作过程分析

本设计中负载电容  $C_{charge} = 0.66\mu\text{F}$ , 分布电容  $C_{winding} = 0.003\mu\text{F}$ , 变压器变比为 1:7, 其漏感  $L_{leakage} = 20\mu\text{H}$ . 由于负载电容在充电的同时还要参与谐振, 所以工作时等效到变压器初级的谐振电容

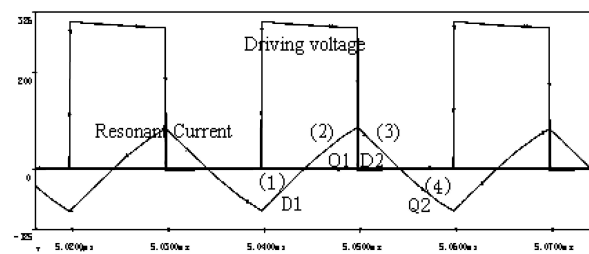


图 2  $f_s = 50\text{kHz}$  时 MOS 驱动电压及谐振电流仿真波形

近似为  $C_r = n^2(C_{charge} + C_{winding}) \approx 34.5\mu\text{F}$ , 故完全利用电路自身的参数得到的谐振频率  $f_0 = 1/2\pi\sqrt{L_{leakage}C_r} \approx 6\text{kHz}$ , 设计选择开关管设计频率  $f_s = 50\text{kHz}$ , 远高于谐振频率, 即变换器工作于过谐振模式 (ARM).

2008 - 01 - 07 收稿

\* 国家自然科学基金(10475073)资助

1) E-mail: lshang@ustc.edu.cn

图2是用PSPICE在ARM下对等效主电路仿真的波形图,电源输入电压为300V.一个开关周期下逆变器各器件依次导通工作顺序如图2所示.由图分析可知,在一个开关过程中,相邻两个换流开关器件的触发有重叠,该电路可以实现开关管Q1, Q2的软开通,反并联二极管D1, D2的软关断<sup>[4]</sup>.

结合上述工作过程,对充电过程进行定性分析.

电路满足如下方程<sup>[4]</sup>

$$\begin{cases} V_g(t) = V_C(t) + L_r \frac{di_L}{dt}, \\ V_C(t) = \frac{1}{C_r} \int (i_L - I_0) dt. \end{cases} \quad (1)$$

在电路工作于过谐振模式(ARM),工作频率较高( $f_s/f_0 \gg 1$ )的前提下,由于在充电过程中,负载电容参与谐振致使等效谐振电容 $C_r$ 较大, $i_L - I_0$ 较小,所以 $V_C$ 相对 $V_g$ 很小,谐振电感在电容充电过程中起了主要作用.为了估算充电功率的大小,作如下假设:①忽略谐振电容;②电路处于稳态时,结合图2,近似认为充电电流为三角波.基于以上假设,对(1)式进行近似化简得到: $V_g \approx L_r \frac{di_L}{dt}$ .则 $T_S/4$ 时刻可达到的峰值充电电流近似为 $i_p = \frac{V_g}{4L_r} T_S$ ,所以一个开关周期的平均充电电流近似为

$$I = \frac{V_g}{8f_s L_r}. \quad (2)$$

由(2)式得到半桥并联谐振电路的一个特性:平均充电电流反比于开关频率,即提高开关频率,平均充电电流减小,输出电压会降低.由此看出,当输入电压和开关频率不变时,该电路体现出恒流充电的特点.

$$\text{充电时间 } t = \frac{C_{\text{charge}} U_0}{I_0} = \frac{C_{\text{charge}} n V_g}{1/n}, \quad (3)$$

式中 $U_0$ 为输出电压, $I_0$ 为变压器次级的负载电容充电电流.

充电功率

$$P = \frac{1}{2} C_{\text{charge}} U_0^2 f_{\text{rep}} = \frac{1}{2} \frac{C_{\text{charge}} U_0^2}{t} = \frac{1}{2} I V_g \approx \frac{1}{16} \frac{V_g^2}{f_s L_r}, \quad (4)$$

式中 $f_{\text{rep}}$ 为充电重复频率,(4)式说明充电功率与负载电容无关.

## 4 实验

设计中开关器件选择了高频性能较好的高频MOS管IRFP460,反并联二极管利用了其体二极管.电源输入整流后测得电压为360V,根据(4)式可得充

电功率为

$$P \approx \frac{1}{16} \frac{V_g^2}{f_s L_r} = \frac{180^2}{16 \times 50 \times 10^3 \times 20 \times 10^{-6}} = 2025 (\text{J/s}).$$

所以该电路设计可以实现2 kJ/s的充电功率.

图4波形为图3中充电电流包络的展开,结合上图可知,在充电过程中,充电电流近似为三角波,且充电电压的线性度较好.实验设计中利用锁相环CD4046的压控振荡器(VCO)实现 $U/f$ 转换,从而对MOS管IRFP460进行开关频率控制.分析图3中的充电电流包络可知,在线性充电的过程中,开关频率 $f_s$ 基本不变,即充电电流包络较平稳.当充电快结束时, $f_s$ 迅速增大,使充电电流迅速减小.当充电完毕后,充电电流的波形为断续状态,即此时通过反馈,比较逻辑电路使CD4046工作于断续输出状态,从而控制MOS管断续工作,且频率很高,以实现电容充电电压的实时精确调整.

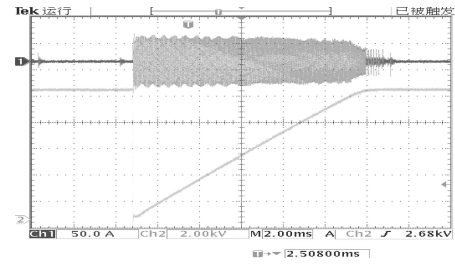


图3  $f_s = 50\text{kHz}$ 时电容充电电流包络与电压波形

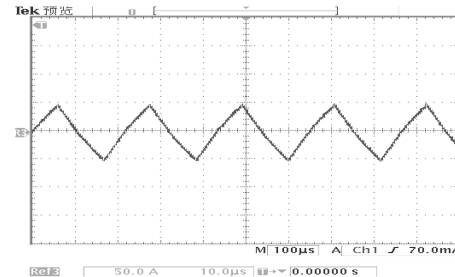


图4  $f_s = 50\text{kHz}$ 时电容充电电流波形

## 5 结论

本文提出了一种新颖的并联谐振高压开关电路,充分利用了变压器的漏感和分布电容作为谐振参数,避免了他们对回路造成的影响,且无需使用其他谐振元件,实现了电路的简化.文章对并联谐振电路过谐振工作模式下的充电功率进行了定性分析.通过对实验波形的分析,说明利用调频控制,该电路具有对电容实现恒流充电的特性,且调整精度较高,所以该电路将应用于高压充电电源设计,运用于脉冲冲击磁铁调制器中.

## 参考文献(References)

- 1 SU J C et al. High Power Laser and Particle Beams, 2004, **16**(12): 1611—1614 (in Chinese)  
(苏建仑等. 强激光与粒子束, 2004, **16**(12): 1611—1614)
- 2 ZHONG Q H et al. High Voltage Engineering, 2003, **29**(8): 7—9 (in Chinese)  
(钟和清等. 高电压技术, 2003, **29**(8): 7—9)
- 3 SHANG L et al. High Power Laser and Particle Beams, 2001, **10**(1): 103—107 (in Chinese)  
(尚雷等. 强激光与粒子束, 2001, **10**(1): 103—107)
- 4 Young G K, Anand K U, Dennis L S. IEEE Trans on Industry Applications, 1991, **27**(2): 386—395

## Application of Parallel Resonant Circuit in Modulator Charging Power Supply<sup>\*</sup>

GUO Liang SHANG Lei<sup>1)</sup> LIU Chao

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

**Abstract** A novel high voltage switching circuit with parallel resonant topology is analyzed. Without adding other resonant components, this circuit makes full use of the transformer leakage inductance and winding capacitance so as to reduce the influence of the transformer parasitic parameter. Using device CD4046 to realize the switching control of MOS, this circuit can realize the constant-current charging to capacitor by operating the above resonance. The operating process of the circuit is analyzed, and the power calculation and some practical waveforms are given.

**Key words** parallel resonant, above resonance mode (ARM), capacitor charging

---

Received 7 January 2008

\* Supported by NSFC (10475073)

1) E-mail: lshang@ustc.edu.cn