

# 有源箝位 ZVS-PWM 开关变换器应用

北京卫星制造厂 万成安 刘文贵

**文摘** 研究和分析有源箝位 ZVS-PWM 开关变换器的工作原理及卫星电源设计中应用软开关技术的可行性和必要性,有源箝位 ZVS-PWM 开关变换器有很大的优点,通过高频软开关技术的研究和应用,可以有效地减小卫星上 DC/DC 变换器的重量和体积,以满足不断发展的新型号航天飞行器的要求。

**关键词** 高频 软开关 有源箝位 同步整流 DC/DC 变换器

## 1 引言

电源技术的发展要求 DC/DC 变换器功率密度高、体积小,电源设计者需要提高开关电源的工作频率,同时改善电源的效率,用通常的设计很难满足上述要求,需要解决高频下由寄生参数和开关损耗增大所引起的问题。

高频软开关技术就是在解决高频下开关损耗问题的基础上发展起来的,应用高频谐振和准谐振软开关电源具有效率高、体积小、重量轻等优点,现已在电子、通讯等行业得到了广泛的应用。

高频软开关电源的电路形式较多,其中,有源箝位 ZVS-PWM 变换器电路比较适合中、小功率的开关电源,电路拓扑相对简单,恒频控制,效率可达 85%,如果应用同步整流技术效率可达 90%,功率开关管承受的应力也比较小,这些特性非常适合空间应用,可以用于卫星电源的设计中,本文将探讨有源箝位 ZVS-PWM 开关变换器应用于卫星电源的可行性。

## 2 有源箝位 ZVS-PWM 开关变换器的实现

有源箝位(ZVS-PWM)电路可以通过单端正激和反激电路及他们的组合来实现,这几种电路在箝位方式和能量处理方式上有一定的区别,下面分别加以讨论:

### 2.1 有源箝位(ZVS-PWM)单端反激变换器电路

有源箝位(ZVS-PWM)单端反激电路拓扑如图 1 所示,它是在 PWM 单端反激电路的基础上增加一个箝位开关(功率 MOS 管)和一个箝位电容来实现,利用箝位电容及 MOS 管的输出电容和变压器绕组的漏电感谐振,创造主开关 ZVS(零电压开通)的条件,同时提供有效的路径吸收变压器的漏感能量。改善功率变换级的效率。在主开关关断期间,由箝位电容的电压将主开关两端的电压钳在一定的电压水平上,基本保持不变,可以减少主开关管的应力。

创造主开关 ZVS(零电压开通)的条件,有两种方法实现,第一种方法是:减小变压器的磁化感应,这样磁化电流将有比负载更高

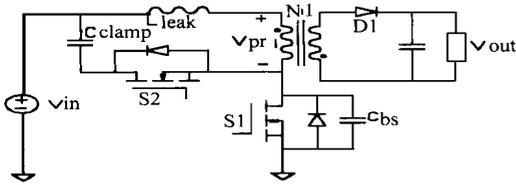


图1 有源箝位ZVS-PWM反激  
变换器主电路

的峰值, 多余的磁化电流将通过S1的输出电容在S2关断后放掉, 缺点是在变压器的初级形成高的电流峰值。第二种方法是在整流二极管D1的回路中串联一个可饱和电感, 这种方法的优点是可以最大限度地减小初级峰值电流, 饱和电感在S2关断后暂时使变压器和负载断开, 此间, 全部的磁化电流经功率开关管S1的输出电容放电。这样, 更高的磁化电流可以得到利用, 并且峰值磁化电流有所下降。

2.2 有源箝位(ZVS-PWM)单端正激变换器电路

有源箝位(ZVS-PWM)单端正激变换器电路拓扑和反激电路拓扑略有不同, 实现主开关ZVS(零电压开通)的原理基本一样, 区别在于他们的工作方式不同。

相对来说, 有源箝位更适用于单端正激变换器, 因为单端正激变换器利用有源箝位, 可以实现功率变压器磁心磁通的自动复位, 无需另加复位措施; 并可以使激磁电流沿正负反向流动, 使磁心在磁化曲线的第一和第三象限, 提高磁心的利用率。图2为有源箝位(ZVS-PWM)单端正激变换器的电路拓扑。

2.3 有源箝位(ZVS-PWM)单端正、反激组合变换器电路

有源箝位单端正激变换器和反激变换器的组合, 即形成了有源箝位(ZVS-PWM)单端正、反激组合变换器, 正激变换器和反激变换器的变压器T1和T2原边绕组串联, 副边

接成中心抽头输出, 箝位开关和箝位电容并联在T1和T2原边绕组上, 这种组合在一个周期内, 两台变换器轮流向负载供电。

有源箝位单端正、反激变换器的特点是: 主开关和箝位开关都实现了ZVS, 使开关损耗减小, 电路效率提高。主功率开关管的电应力减小。见图3。

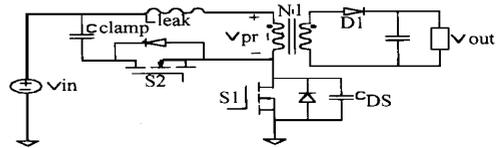


图2 有源箝位ZVS-PWM正激  
变换器主电路

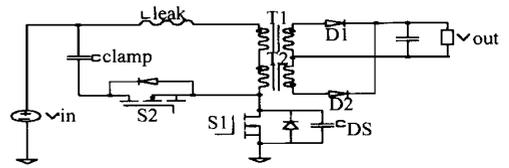


图3 有源箝位ZVS-PWM正、  
反激变换器主电路

2.4 具有同步整流的有源箝位(ZVS-PWM)单端正激变换器电路

影响电源变换器效率的主要因数有功率开关管的开关损耗、变压器损耗和输出整流二极管的损耗, 随着输出电流的增大, 整流二极管的损耗也随之增大, 因此在输出功率较大时, 需要设法降低输出整流二极管的损耗。

采用同步整流的方法可以降低变换器输出整流管的功率消耗, 功率为50~300W的DC/DC变换器采用同步整流管, 可使正向电压降低到原来的1/2~1/3, 在有源箝位(ZVS-PWM)单端正激变换器中应用同步整流, 可提高变换器的效率5%~10%。见图4。

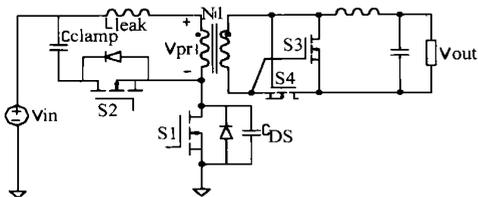


图4 具有同步整流的有源箝位 ZVS-PWM 正、反激变换器主电路

2.5 控制电路的实现

控制电路主要由 PWM、栅极驱动和延时电路、隔离放大和比较电路、辅助电源等电路组成,电路框图如图 5。

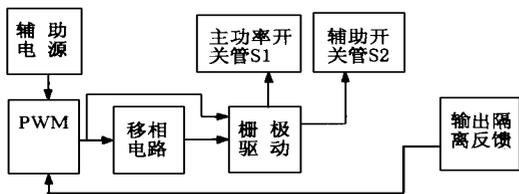


图5 控制电路的原理框图

脉宽调制器 PWM 一般可用高频脉宽调制专用集成电路 UC1823、UC1825 等,工作频率范围可高达 1MHz,移相电路可以用单稳态触发器 CD4098 及阻容元件组成,或通过专用移相集成电路实现,主功率开关管和辅助箝位开关管的栅极驱动信号在时序上有一定的要求,因此,移相电路的设计非常重要,一般 PWM 脉宽调制集成电路内部包含栅极驱动电路,一般不需要再外加驱动电路,但是,当输出功率较大,功率 MOS 管的驱动能力不够时,可选用专用电路有 IR2110、TC4220、TC4229 等高速、大电流驱动集成电路。

为了简化电路,国外现在已推出有源箝位的专用集成电路,如 UC3875、UCC3580 等,UC3875 用于全桥软开关电路的设计,UCC3580 特别适合有源箝位变换器电路的设计,其内部包括振荡器、精密基准电压源、

误差放大单元、两路输出驱动信号,输出驱动信号的延时时间可以精确地调节,使有源箝位电路的设计得到了简化。

由于专用电路的应用,简化了有源箝位 ZVS-PWM 控制电路的设计,为卫星电源应用源箝位 ZVS-PWM 电路提供了更好的条件。

3 有源箝位 ZVS-PWM 反激变换器电路的稳态理论分析

在电感电流连续工作模式(CCM)下,有源箝位反激变换器的各主要变量的稳态波形如图 6 所示,共有七种工作模式,各种工作状态下的等效电路如图 7 所示。

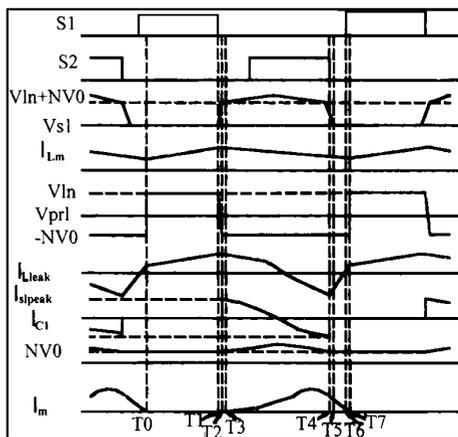


图6 连续导电模式下有源箝位反激变换器的各主要变量稳态波形

T0-T1: T0 时,主开关管 S1 导通,辅助开关管 S2 截止,输出整流二极管 D1 和反向并联连接在辅助开关管 S2 上的二极管反偏,变压器电感和漏感的电流线性上升,其工作状态就象“正常”的反激电路一样。

T1-T2: 在 T1 时,辅助开关管 S1 截止,磁化电流给 C<sub>DS</sub> 充电,实际上 C<sub>DS</sub> 有谐振

方式充电, 充电的时间非常短, 形成一种近似的线性充电特性。

T2- T3: 在T2时,  $C_{DS}$  充电到  $V_{DS} = V_{in} + V_c$ , 辅助开关管的反向并联二极管导通, 箝位电容钳住变压器电感和漏感的电压固定

到  $V_c$  (近似为  $NV_0$ ), 在两个电压之间形成电压分配, 由于环路寄生电阻的存在, 电压并不能瞬间分配, 而是按指数规律变化, 因为箝位电容  $C_{clamp}$  的值远大于  $C_{DS}$ , 几乎所有的磁化电流通过二极管至箝位电容。

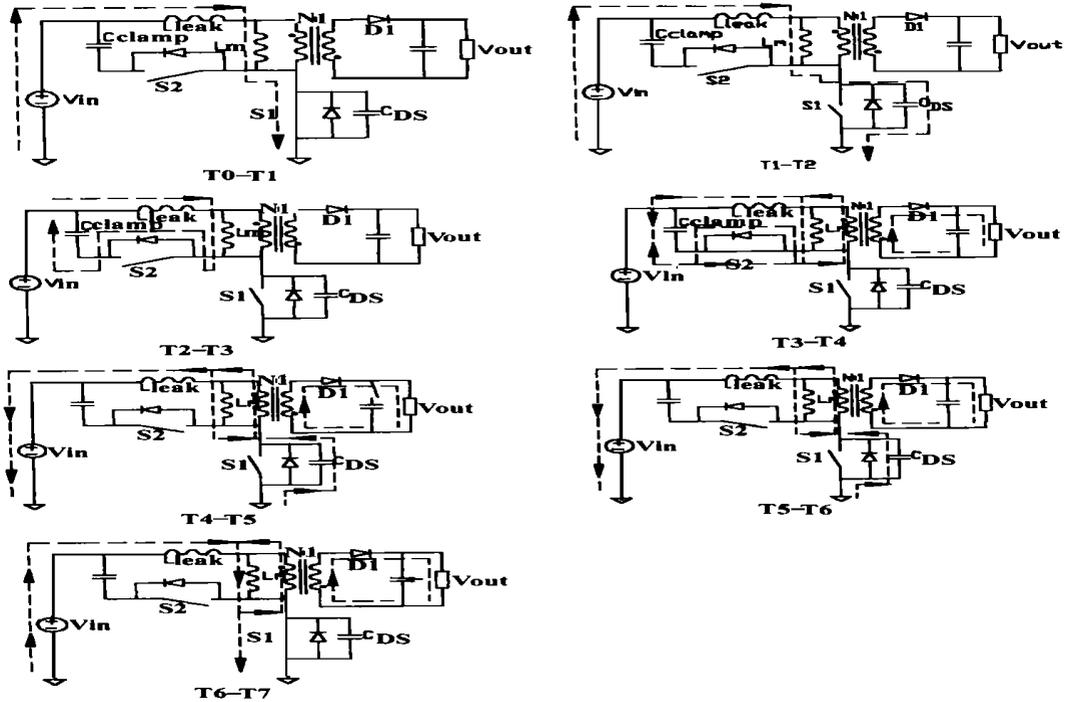


图7 连续导电模式下有源箝位 ZVS- PWM 反激变换器的七种工作状态的等效电路

T3- T4: 在T3时, 变压器的初级电压  $V_{pri}$  已经下降到足以使输出整流管  $D_1$  正向导通, 变压器的初级电压被箝位在  $NV_0$  的电平, 漏感  $L_{leak}$  和箝位电容  $C_{clamp}$  开始谐振, 在这个期间到箝位电容的电流反向流动时, 辅助开关管导通。

T4- T5: 辅助开关管  $S_2$  在T4时关断, 箝位电容  $C_{clamp}$  的回路消失, 一个新的谐振网络在漏感  $L_{leak}$  和功率 MOS 管的源-漏电容之间形成, 变压器的初级电压维持在  $NV_0$ ,  $C_{DS}$  开始放电。

T5- T6: 假设贮存在漏感  $L_{leak}$  的能量大于  $C_{DS}$  的能量, 在T5时,  $C_{DS}$  放电到足以使功率开关管  $S_1$  的体二极管导通, 在漏感两端的电压被箝位在  $V_{in} + NV_0$ , 在这个期间功率开关管  $S_1$  在零电压条件下开通。

T6- T7: 功率开关管导通, 漏感电流增加时, 次级电流减小, 在T7时, 次级电流降到零(因为漏感电流等于次级激磁电流), 输出整流管反向偏置, 磁场和漏感开始线性充电, 重新开始另一个周期。

## 4 可行性分析

通过前面的分析可以看出,应用有源箝位软开关电路设计技术基本上可以满足卫星电源的效率高、性能好、体积小、重量轻、长寿命、高可靠的要求,另外,我们多年从事卫星电源的设计,已经积累了丰富的经验,下面就应用有源箝位 ZVS-PWM 反激变换器的可行性进行简要的分析:

### 4.1 设计可行性

目前星上电源采用 PWM 脉宽调制方式的单端反激式 DC/DC 变换器, PWM 脉宽调制变换器的特点上性能好,工作稳定、可靠,这在我国研制的多种型号卫星中已经得到验证,我们曾经试图进行过提高电源的工作频率,但是,随着 PWM 开关频率的提高,电源的效率反而下降,另外,由于高频引起的寄生参数的影响较大,效果不理想。根据前面的分析可以看出,采用有源箝位软开关电路设计技术,正好可以弥补高频引起的开关损耗大、开关管应力高等问题。从电源电路结构来看,有源箝位 ZVS-PWM 软开关变换器的主电路只比我们使用的单端反激式 DC/DC 变换器的主电路增加了一个辅助开关管和一个箝位电容,实现比较容易;在控制回路,增加了一路驱动信号,如果使用 PWM 高频集成电路,需要增加移相电路和驱动电路,电路较为复杂,但是,如果使用有源箝位的专用集成电路,电路就会简单实用。

在有源箝位 ZVS-PWM 软开关变换器的输出整流电路,如果采用 VMOS 管进行同步整流时,可以进一步地提高电源效率,大约可以提高到 90%,这个指标,对卫星电源来说,是有相当吸引力的。

### 4.2 工艺可行性

根据国内外的研究报道,有源箝位 ZVS-PWM 软开关变换器的工作频率可以达到 500kHz,我们进行有源箝位 ZVS-PWM 软

开关技术的应用,可以选择工作频率为 200-400kHz,这样,常规的生产工艺可以实现,另外,高频磁芯材料的选取也比较方便,国内有南京的 898 厂,已经研制出高频的磁芯材料,基本可以满足高频电源的使用要求。

### 4.3 可能存在的问题

应用有源箝位 ZVS-PWM 软开关变换器的设计技术,电路拓扑比较复杂,使用元件的数量增加了,在高频情况下变压器和功率元件的寄生参数影响较大,电路的工艺设计需要严格的控制,这些是我们可能遇到的主要问题。

### 4.4 解决问题的方法

首先需要简化电路设计,选择满足航天产品需要的元件进行试验,在电路的性能指标与电源的可靠性相矛盾时,以稳定可靠为主。其次是配备高性能的试验和分析仪器,进行高频电路的稳态特性和动态特性分析,合理选择电路元件,另外,应用电路的仿真设计和电路试验相结合的方法,实现有源箝位 ZVS-PWM 软开关变换器的优化设计。

## 5 结论

目前,国内外研究和应用高频和软开关工作方式的开关电源已成为一种趋势,根据卫星电源的工作方式和功率需求,在原来 PWM 硬开关电源的基础上,应用软开关和有源箝位技术,实现软开关 ZVS-PWM 的有源箝位工作方式,这种工作方式也比较其它形式的高频及软开关电路简洁、实用,也更适合于卫星电源的应用。

但是,软开关 ZVS-PWM 的有源箝位电路设计较硬开关电路复杂,在高频条件下工作,电路对加工和生产工艺都有一定的要求,需要我们进行深入的试验和研究,研制出适合新型航天飞行器使用的高性能电源。

参考文献(略)