

不对称半桥变换器的分析与设计

杨黎 蒋启龙

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 不对称半桥工作在软开关模式可以减小开关损耗, 提高电源的效率。本文分析了不对称半桥的工作原理和实现零电压开关的条件, 以一台咖啡机电源为例来说明电源的设计过程。最后, 实验结果证明电源在零电压开通。

关键词: 不对称半桥; 零电压开关; 软开关

Analysis and Design of Asymmetrical Half-Bridge Converter

YANG Li, JIANG Qilong

(Electrical Engineering School of Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: An asymmetrical half-bridge operating in soft switching mode can reduce switching power loss and improve the efficiency of power supply. This paper analyzes the operation principle of an asymmetrical half-bridge and the requirement of realizing ZVS in operation. An example is presented to explain the design procedure from a coffee power. Finally, the experimental results show that the power turns on at zero voltage.

Keywords: asymmetrical half-bridge; ZVS; soft switching

不对称半桥采用固定死区的互补PWM控制方式。利用电路本身的特点, 开关管的寄生电容和变压器的漏感, 在两个开关管的死区时间里, 发生谐振, 实现零电压软开关。在没有增加额外器件的条件下, 就实现了软开关, 提高了变换器的效率, 和半桥硬开关相比, 成本增加非常小, 有利于提高它的市场竞争力。

VD₂及输出电感L_o和电容C_o组成低通滤波电路, 其中VT₁与VT₂的控制信号互补, 主电路的ZVS是通过开关转换过程中的谐振电容和变压器的漏感发生谐振实现的。

在进行软开关过程分析之前, 先做如下假设:

(1) 忽略变压器原边的漏感, 磁化电流I_m不变;

1 不对称半桥软开关过程分析

1.1 不对称半桥的工作原理

不对称半桥主电路如图1所示, 一次侧包含两个开关VT₁与VT₂, 变压器的漏感L_r及隔直电容C_c, 二次侧为中心抽头的变压器加上整流二极管VD₁与

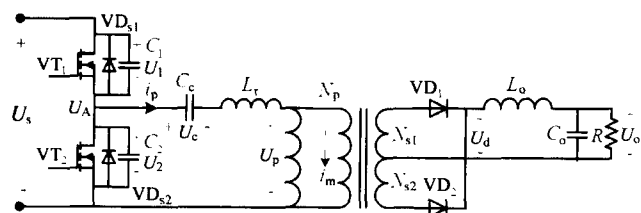


图1 不对称半桥主电路

(2)忽略纹波,电容 C_c 足够大,认为其上电压 U_c 不变;

(3)忽略输出二极管的正向压降和二极管的反向恢复电流;

(4)滤波电感足够大,开关过程中,负载电流 I_o 总是连续的。

下面分8个工作模式来分析开关 VT_1 和 VT_2 的ZVS过程。工作波形如图2所示。其中 n_1 和 n_2 是变压器副边与原边的匝数比:

$$n_1 = \frac{N_{s1}}{N_p}, n_2 = \frac{N_{s2}}{N_p}$$

(1) $t_0 \sim t_1$ (线性充放电模式)

当 $t=t_0$ 时,开关管 VT_1 关断,变压器漏感电流流过 C_1 和 C_2 ,电容 C_1 充电, C_2 放电。负载电流流过二极管 VD_1 ,在 $t=t_1$ 时刻, $U_2=U_c=DU_s$,该阶段结束。

(2) $t_1 \sim t_2$ (谐振暂态模式)

当 $t=t_2$ 时,二极管 VD_1 和 VD_2 同时导通,变压器原副边解耦, L_r 、 C_1 、 C_2 及 C_c 串联谐振,直到电容 C_2 的电压被放至0V, VD_{s2} 导通,为 VT_2 零电压开通创造条件。

(3) $t_2 \sim t_4$ (电感放电模式)

当 $t=t_2$, U_A 变为零,开关管 VT_2 的反并联二极管 VD_{s2} 开始导通,漏感电流线性下降。在 $t=t_3$ 时,变压器原边电流 i_p 过零并反向增大,二极管 VD_1 和 VD_2 继续共同导通。

(4) $t_4 \sim t_5$ (能量传送模式)

当 $t=t_4$ 时,开关管 VT_2 完全导通,二极管 VD_1 关断,流过二极管 VD_2 的电流为 I_o ,此时, $U_A=0$,当 $t=t_5$ 时,开关管 VT_2 关断,该阶段结束。

(5) $t_5 \sim t_6$ (线性充放电模式)

当 $t=t_5$ 时,开关管 VT_2 关断,电容 C_1 放电, C_2 充电,负载电流流过二极管 VD_2 ,在 $t=t_6$ 时刻, C_2 的电压充电至 DU_s ,该阶段结束。

(6) $t_6 \sim t_7$ (谐振暂态模式)

当 $t=t_6$ 时,二极管 VD_1 和 VD_2 同时导通,变压器原副边解耦, L_r 、 C_1 、 C_2 及 C_c 串联谐振,直到电容 C_1 的电压被放至0V, VD_{s1} 导通,为 VT_1 零电压开通创造条件。

(7) $t_7 \sim t_8$ (电感放电模式)

当 $t=t_7$, U_A 等于 U_s ,开关管 VT_1 的反并联二极管 VD_{s1} 开始导通,漏感电流线性上升。在 $t=t_8$ 时,变压器原边电流 i_p 过零并正向增大,二极管 VD_1 和 VD_2 继续共同导通。

(8) $t_8 \sim t_{10}$ (能量传送模式)

当 $t=t_8$ 时,开关管 VT_1 完全导通,二极管 VD_2 关断,流过二极管 VD_1 的电流为 I_o ,此时, $U_A=U_s$,当 $t=t_{10}$ 时,开关管 VT_1 关断,该阶段结束。

1.2 实现软开关的条件

由于参数和运行条件的不同,电路的开关转换的方式也不完全相同,有的能够实现ZVS,有的则不能。通过前面对开关管 VT_1 和 VT_2 的ZVS过程分析可知,要实现不对称半桥DC/DC变换器的ZVS,需要从以下两方面考虑:

(1)要有适当的负载电流,公式(1)和(2)是产生ZVS的条件:

$$I_{p6} > \frac{U_s - U_c}{Z_n} \quad (1)$$

$$I_{p1} > \frac{U_c}{Z_n} \quad (2)$$

其中, I_{p1} 为 t_1 时的变压器原边电流; I_{p6} 为 t_6 时的变压器原边电流; Z_n 为特性阻抗, $Z_n = \sqrt{L_r/2C}$, $C=C_1=C_2$ 。

在稳态条件下化简,得到开关管 VT_1 的零电压

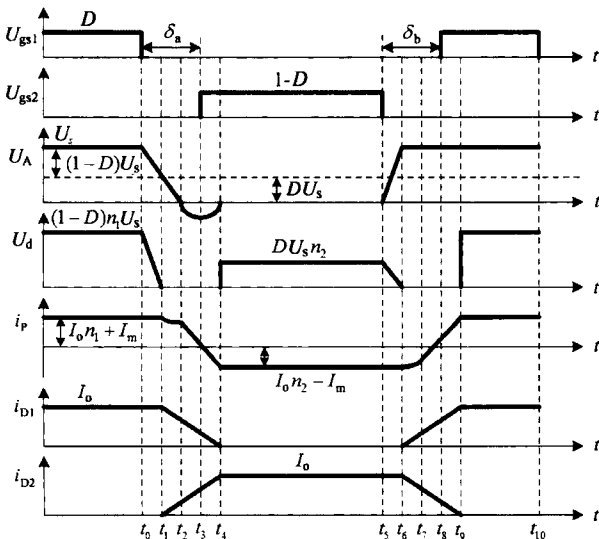


图2 不对称半桥ZVS波形

条件:

$$Z_n > \frac{U_s(1-D)}{I_o D(n_1+n_2)} \quad (3)$$

开关管VT₂的零电压条件:

$$Z_n > \frac{U_s D}{I_o(1-D)(n_1+n_2)} \quad (4)$$

由式(3)和(4)可得,输入电压、负载电流、变压器匝比、特性阻抗和占空比等都会影响开关管的ZVS条件:

a.减小输出电压,增大负载电流,增大变压器匝比,有利于实现ZVS;

b.增大特征阻抗,即增加漏感,减小谐振电容,有利于实现ZVS;

c.当D<0.5时,开关管VT₂比VT₁容易实现ZVS,且D越小,开关管VT₂越容易实现ZVS,而开关管VT₁越难实现。当D>0.5时,情况刚好相反。所以,占空比D在0.5附近,两个开关管都容易实现ZVS。

(2)为避免直通,桥臂上下两个开关管的驱动脉冲之间要保证适当的死区时间。

要使开关管VT₁在电压过零时开通,需满足:

$$t_7-t_5 < \delta_b < t_8-t_5$$

其中:

$$\begin{cases} t_7-t_5 = \frac{2CU_s}{I_o(n_1+n_2)} + \frac{1}{\omega_k} \arcsin\left[\frac{U_s(1-D)}{I_o Z_n D(n_1+n_2)}\right] \\ t_8-t_5 = (t_7-t_5) + L_1 \sqrt{\left[\frac{I_o D(n_1+n_2)}{U_s(1-D)}\right]^2 - \frac{1}{Z_n^2}} \end{cases} \quad (5)$$

要使开关管VT₂在电压过零时开通,需满足:

$$t_2-t_0 < \delta_a < t_3-t_0 \quad \text{其中:}$$

$$\begin{cases} t_2-t_0 = \frac{2CU_s}{I_o(n_1+n_2)} + \frac{1}{\omega_k} \arcsin\left[\frac{U_s D}{I_o Z_n(1-D)(n_1+n_2)}\right] \\ t_3-t_0 = (t_2-t_0) + L_1 \sqrt{\left[\frac{I_o(1-D)(n_1+n_2)}{U_s D}\right]^2 - \frac{1}{Z_n^2}} \end{cases} \quad (6)$$

从上面的表达式可以看出,即使确定了死区时间δ_a和δ_b,由于运行的条件不同,将会出现ZVS导通时间的偏移,有可能使电路无法实现ZVS。因此,除了选择合适的死区时间,还要让电路在D=0.5附近工作。

2 实例设计

下面以一台咖啡机电源为例,来说明主电路参数的计算过程。由于不对称半桥的前一级有PFC,所以输入电压U_s=400V。要求输出电压U_o=24V,输出电流I_o=5A,输出电压纹波ΔU_v=50mV,开关频率f_s=80kHz,效率η>0.85。

(1)变压器设计

在设计变压器时,首先选择磁芯。变压器功率为140W左右,工作频率为80kHz,选择型号为PL-9 DS3319的铁氧体磁芯,部分参数为:电感系数A_L=7450±25% nH/N²,磁芯截面积A_e=147.4mm²,铁芯有效体积V_e=7576mm³,等效磁路长度l_e=51.4mm。

由于输入电压为400V,输出电压为24V,最大占空比不可能达到0.5,现设定工作占空比D=0.25,考虑到死区,(1-D)=0.65。

$$n_1+n_2 = \frac{U_o}{U_s D(1-D)} = \frac{24}{400 \times 0.25 \times 0.65} = 0.369$$

接着计算一次侧匝数N_p,依据安培定律与法拉第定律,ΔB=2500,则

$$N_p = \frac{U_s D(1-D)}{A_e \Delta B f_s \cdot 10^{-8}} = \frac{400 \times 0.25 \times 0.65}{1.474 \times 2500 \times 80K \times 10^{-8}} \approx 22$$

变压器副边匝数:N_sN_{s1}+N_{s2}=(n₁+n₂)N_p=0.369×22≈8

然后计算变压器电感值L,激磁电流变化量ΔI_m=3I_{rms}=1.059A,则

$$L = \frac{N_p \Delta B A_e \cdot 10^{-8}}{\Delta I_m} = \frac{22 \times 2500 \times 1.474 \times 10^{-8}}{1.059} = 0.766mH$$

(2)输出滤波电感L_o

假定滤波电感电流纹波系数λ=0.2,最小负载电流I_{dc}= $\frac{\lambda I_o}{2}$ =0.5A,则

$$L_o = \frac{0.05V_o T_s}{I_{dc} f_s} = \frac{0.05 \times 24}{0.5 \times 80 \times 10^3} = 30 \text{ H}$$

(3)输出滤波电容C_o

输出滤波电容的大小是由输出纹波电压决定的,令纹波电压ΔU_v=50mV,则

$$C_o = \frac{\lambda I_o \cdot 65 \times 10^{-6}}{\Delta U_v} = \frac{0.2 \times 5 \times 65 \times 10^{-6}}{0.05} = 1300 \mu\text{F}$$

考虑到等效内阻的影响,取两个1000 μF,耐压35V的电解电容器并联。

(4) 隔直电容 C_c

隔直电容 C_c 和电感 L_o 折算到原边的电感 $n_1^2 L_o$ 组成了一个串联谐振电路,一般谐振频率为开关频率的 $1/15 \sim 1/10$, 则

$$C_c = \frac{10^6}{4\pi^2 (0.1 \cdot f_s)^2 n_1^2 L_o} = 0.436 \mu\text{F}$$

实验中选取 $0.47 \mu\text{F}$, 耐压450V的无极性薄膜电容。

(5) 功率MOSFET的选择

功率MOSFET可以根据它的开关电流和最大阻断电压来选择。

最大开关电流:

$$I_{s1\max} = \frac{I_{\text{rms}}}{D} + \frac{3 \cdot I_{\text{rms}}}{2} = 1.94 \text{ A}$$

$$I_{s2\max} = \frac{I_{\text{rms}}}{1-D} + \frac{3 \cdot I_{\text{rms}}}{2} = 1.072 \text{ A}$$

根据上述结果选择MOSFET, 实验时选11N60C3。

(6) 输出整流二极管的选择

二极管可以根据方波电流和阻断电压来选择。

方波电流: $I_{D1} = I_{D2} = I_o = 5 \text{ A}$

二极管阻断电压:

$$U_{D1\max} = \frac{U_o}{D} = 96 \text{ V}, \quad U_{D2\max} = \frac{U_o}{1-D} = 37 \text{ V}$$

根据上述结果,实验时选取超快恢复二极管U1620。

3 实验结果

图3和图4为24V、5A情况下漏-源电压波形,从波形可以看出 VT_1 和 VT_2 都实现了ZVS, 此时电源的效率为88%。当负载电流为1.25A时, VT_2 的漏-源电压波形如图5所示, 开关管在导通时漏-源电流发生振荡, 变换器的损耗较大, 此时没有实现ZVS。随着负载电流的增加, VT_2 比 VT_1 先实现

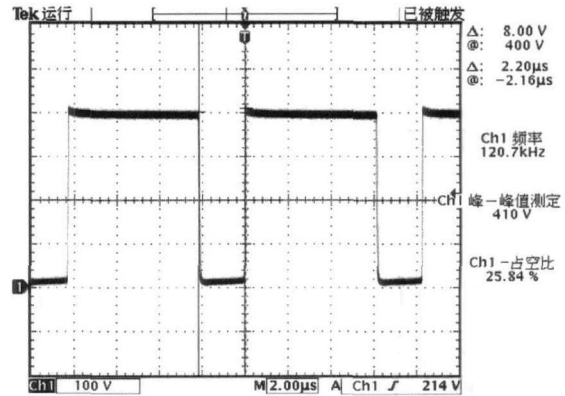


图3 VT_1 实现ZVS的漏-源电压波形

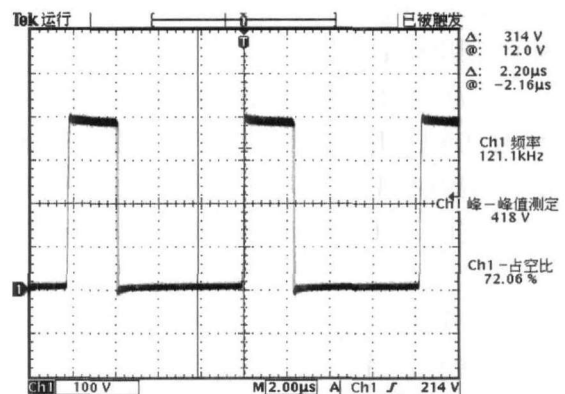


图4 VT_2 实现ZVS的漏-源电压波形

ZVS, 所需的最小负载电流可以通过式(3)和(4)计算得到。当负载电流为5A, 但死区条件不满足时, 漏-源电压波形如图6所示, 开关管没有实现ZVS, 电源的效率为86.9%。比在ZVS条件下的效率低1.1%。

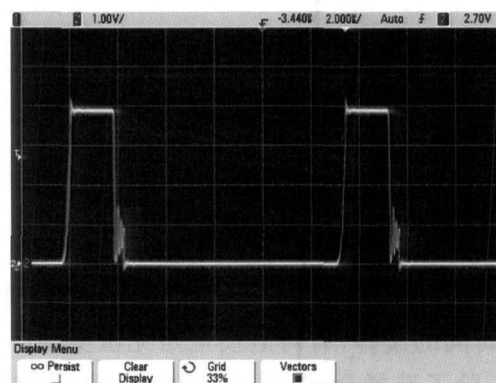


图5 负载较轻时 VT_2 的漏-源电压波形

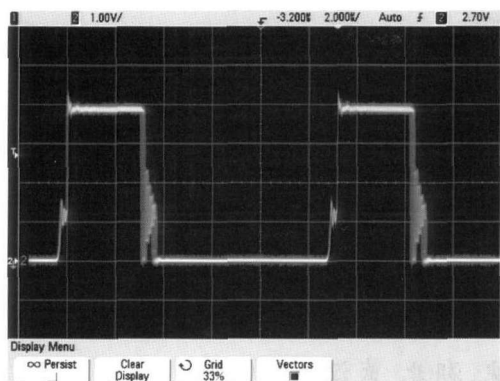


图6 死区时间不满足时 VT_2 的漏-源电压波形

5 结论

不对称半桥利用开关管的寄生电容和变压器的漏感发生谐振,实现开关管的零电压软开关,而不需要额外的元器件。为了充分利用这种拓扑的优势,提高电源的效率,参数的设计就非常重要了,要注意占空比和死区的设置。因此,在中小功率的变换器中,不对称半桥拓扑是一种优先考虑的拓扑。

参考文献

[1] Leu Yi-Hsin, Chen Chern-Lin, Chen Tso-Min. Analysis and design for asymmetrical half-bridge forward mode converters.

PEDS 2001. IEEE International Conference on Volume 1, pp.126-130, 2001.

[2] Xinyu Xu, Ashwin M Khambadkone. Analysis and Design of An Optimized Asymmetrical Half-Bridge DC-DC Converter. PEDS 2003. The Fifth International Conference on Volume 1, pp.120-125, 2003.

[3] Bor-Ren Lin, Huann-Keng Chiang, Chao-Hsien Tseng, Kao-Cheng Chen. Analysis and Implementation of an asymmetrical half-bridge converter. PEDS 2005. International Conference on Volume 1, pp.407-412, 2005.

[4] Bor-Ren Lin, Cheng-Chang Yang. Analysis, Design and Implementation of an Asymmetrical Half-bridge Converter. IEEE International Conference, pp.1209-1214, 2005.

[5] 刘崇正. 高功因半桥转换器之设计与研制. 逢甲大学硕士学位论文, 1993.

[6] 邱兴云. 不对称半桥软开关研究. 重庆大学硕士学位论文, 2003.

[7] 陈丹江, 张仲超. 不对称半桥变换器的研究. 电源技术应用, 2003, (9): 6-9.

作者简介

杨黎(1982-), 男, 西南交通大学电气工程学院硕士研究生, 研究方向为电力电子技术。

军用电源技术研讨会

在“第五届中国国际和平利用军工技术与装备(西安)博览会”期间举办此次研讨会。

主办单位: 陕西省电源学会
《电源技术应用》杂志社
《UPS应用》杂志社

支持媒体: 中国电源网 www.china-power.net
UPS网站 www.upsapp.com

日期: 2008年9月19日上午9:00-12:00
地点: 陕西国际会展中心(省体育场)详见大会指示牌

讲师:
(1)李开省(高级工程师, 中国航空学会理事, 陕西省电源学会副理事长, 115厂总工程师)

报告题目: 军用电源的现状与发展

(2)王其英《电源技术应用》杂志社(主编, 高级工程师, 中国电源学会交流电源专业委员会副主任兼专家组组长)

报告题目: 不间断电源(UPS)在军工上的应用
(3)陈晓峰(高级工程师, 三联科技网络中心运营总监)

报告题目: 电源行业网站发展趋势及中国电源网介绍

◆电源研讨会, 免费听讲, 欢迎报名。

联系人:
(1)中国电源网负责人: 刘博
电话: 029-88153921/3918 传真: 88153918
(2)《电源技术应用》编辑部执行主任: 杨京兰
电话: 010-82026344-20 传真: 82029059