

准谐振开关电源工作频率的研究

任大为, 胡建人

(杭州电子科技大学 新型电子器件与应用研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要: 准谐振(QR)开关电源应用谐振原理实现开关管零电压导通, 从而减小开关损耗。由于电路工作在临界导通模式, 电源工作频率会随输入电压及负载的变化而变化, 给设计工作造成一些困难。为确定变换器的工作频率, 首先从准谐振零电压反激式开关电源的原理入手, 分析了开关周期中开关管漏、源级电压的变化, 建立了各阶段时间与电路参数之间的关系, 得到了开关电源工作频率的计算公式。最后, 基于 L6565 设计实际电路并进行了验证。研究结果为进一步进行优化设计奠定了基础。

关键词: 准谐振; 零电压开关; 工作频率; 反激变换器

中图分类号: TM56; TN7

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)06-0766-03

Research on working frequency of quasi-resonant switching power supply

REN Da-wei, HU Jian-ren

(Institute of Electron Devices & Application, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Quasi-resonant(QR) switching power supply achieve the breakover of switching tube at zero voltage by using the theory of resonant. So it can reduce the loss at switching. Because the circuit is working at critical conduction mode, the frequency of this switching power supply is changed with the input voltage and output load, which brings some trouble for design. In order to certain the optimum working frequency, the theory of QR zero voltage switching (ZVS) flyback was investigated. After analyzing the change of voltage on switch, the relation between the circuit parameter and time in different periods was established. And the formula for calculating the optimum working frequency was deduced. Finally, the experiment based on L6565 was tested. The experimental results show that the analysis lays the foundation for the further more optimization.

Key words: quasi-resonance(QR); zero voltage switching(ZVS); working frequency; flyback converter

0 引言

开关电源的高频化, 可以使开关变换器的体积、重量大大减小, 提高变换器的功率密度, 还可以降低开关电源的音频噪声, 改善动态响应^[1]。但是变换器在硬开关方式下, 电路工作在固定的工作频率, 开关过程中, 开关管的电压与电流同时变化, 电压、电流波形的交叠产生开关损耗。随着变换器工作频率的提高还会引起电磁干扰严重等问题。软开关技术是减少高频化影响的有效手段之一。

软开关是指零电压开关(Zero Voltage Switching, 简称 ZVS)或零电流开关(Zero Current Switching, 简称 ZCS)^[2], 是应用谐振的原理使开关管零电压或零电流导通, 从而降低开关损耗。但是, 由于电路工作在临界导通模式, 准谐振开关变换器的工作频率随着输入电

压与负载的变化而变化, 给设计工作(特别是变压器设计)造成了一些困难。

本研究将从工作原理出发, 研究如何确定准谐振零电压反激式开关电源的工作频率, 以方便电路后续的优化设计。

1 准谐振反激式变换器的工作原理

准谐振零电压反激式开关电源主电路及主要波形如图 1 所示。电路工作过程分为 4 个期间^[3]: 开关管导通期间、开关管关断及缓冲电路作用期间、变压器释放储能期间、缓冲电路复位期间。

1.1 开关管导通期间

$t_0 \sim t_1$ 期间, 等效电路如图 2(a) 所示, 开关管处于导通状态, 初级电感电流以 V_i/L_p 的斜率逐渐增大。

当电流达到预定的最大值 I_{PM} 时,控制器会将开关管关断。因此,开关导通时间 T_{ON} 由下式确定:

$$T_{ON} = \frac{L_P I_{PM}}{V_i} \quad (1)$$

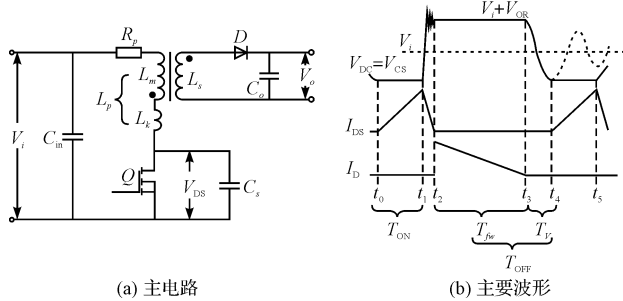


图1 准谐振反激式开关电源

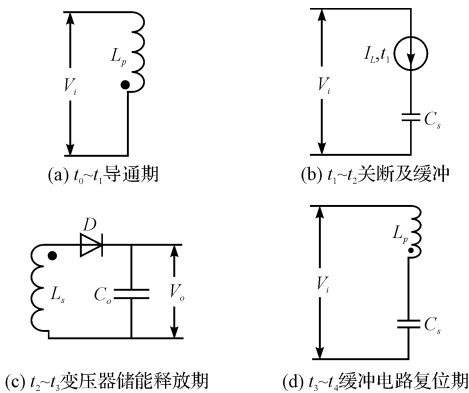


图2 准谐振反激式开关电源各时间段的等效电路

1.2 开关管关断及缓冲电路作用期间

t_1 时刻,开关管关断,变压器初级电流由开关管向缓冲电容器 C_s 转移,由于电容的电压不能跃变,使开关管关断过程中电压很低,接近于零,实现了零电压关断。当开关管漏-源电压 V_{DS} 逐渐上升,当上升到 $V_{DS} = V_i + V_{OR}^{[4]}$ (V_{OR} 为输出电压折算到初级的电压值)后,输出整流二极管 D 导通,变压器储能经输出整流二极管向输出端释放,变压器初级电流为零,电路进入变压器释放储能期间。此阶段时间持续极短,因此,计算时常忽略不计。

要实现零电压关断, C_s 应足够大;另一方面,如果 C_s 的值过大,会使开关管在导通瞬间流过很大的尖峰电流,这个电流会增加损耗。因此, C_s 取 $100 \text{ pF} \sim 2200 \text{ pF}^{[5]}$ 。

1.3 变压器释放储能期间

t_2 时刻, V_{DS} 上升到 $V_i + V_{OR}$, 输出整流二极管导通,电路进入变压器释放储能期间,对应 $t_2 \sim t_3$ 期间,等效电路如图 2(c) 所示。变压器二次绕组释放储能时间 T_{fw} 由下式确定:

$$T_{fw} = \frac{L_s I_{PS}}{V_o + V_D} \quad (2)$$

式中: T_{fw} —变压器完全释放储能的时间, L_s —变压器次级电感, I_{PS} —变压器次级峰值电流。

由变压器初、次级关系^[6],可将式(2)变换为:

$$T_{fw} = \frac{L_P I_P}{V_{OR}} \quad (3)$$

当变压器次级电流降到零,变压器储能全部释放,输出整流二极管自然关断,此时 V_{OR} 也将消失,电路进入缓冲电路复位期间。

1.4 缓冲电路复位期间

缓冲期间复位期间对应 $t_3 \sim t_4$ 期间,等效电路如图 2(d) 所示。由于缓冲电容器上电压 V_{CS} 高于电源电压 V_i ,缓冲电容器通过变压器初级电感以 LC 谐振方式将缓冲电容器电压复位。在此期间,输出电压折射到初级的电压 V_{DS} 将按下式变化:

$$V_{DS}(t) = V_i + V_{OR} e^{-\alpha t} \cos(2\pi f_v t) \quad (4)$$

式中: α —衰减因子, $\alpha = R_p / (2L_p)$; f_v —谐振频率, $f_v = 1 / (2\pi \sqrt{L_P C_S})$ 。

分析式(4)可知,如果不采取措施, V_{DS} 将以阻尼正弦的方式衰减到 V_i , 如图 1(b) 中点划线所示。当 $\cos(2\pi f_v t) = -1$ 时, V_{DS} 取第一个极小值,即 $V_{DS(\min)} = V_i - V_{OR}$, 可以看出,如果 $V_{OR} \geq V_i$, 让开关在此时刻,开通开关管,则开关就能实现零电压导通;如果 $V_{OR} \leq V_i$, 尽管开关无法实现零电压开通,但是让开关在此时刻导通仍然可以最大程度地减小开关的开通损耗。但是,由于电流控制方式下,当占空比 D 大于 50% 时,次谐波不稳定,需要增加用斜坡补偿的方法来改善其工作特性,从而增加了电路的复杂性^[7], 因此, D 应小于 50%, 所以 $V_{OR} < V_i$ 。

当开关管零电压或者低电压导通后,复位过程结束,电路进入开关管导通期间^[8]。缓冲电路复位时间:

$$T_v = \frac{1}{2f_v} = \pi \sqrt{L_P C_S} \quad (5)$$

对于反激式变换器而言,输入峰值电流即变压器初级电感电流峰值 I_{LM} 一般是平均电流的 4 ~ 5 倍左右^[9-10], 在此取 4.5 倍, 因此有:

$$I_P = \frac{4.5 P_i}{V_i} = \frac{4.5 P_o}{\eta V_i} \quad (6)$$

式中: P_i —输入功率, P_o —输出功率, η —所期望的变换器效率。

经整理得到开关电源工作频率 f_s 为:

$$f_s = \frac{1}{T_{ON} + T_{fw} + T_v} = \frac{1}{\frac{4.5L_pP_o}{\eta V_i} \left(\frac{1}{V_i} + \frac{1}{V_{OR}} \right) + \pi \sqrt{L_p C_s}} \quad (7)$$

可见,输入电压的升高或负载的减轻都会使开关频率上升。

3 设计实例与实验验证

为了验证输入电压与负载对开关电源工作频率的影响,本研究采用 L6565 作为控制芯片,制作了准谐振零电压反激式变换器样机。

L6565 是电流控制型 IC,与一般电流控制芯片不同的是,L6565 有一个电流过零检测脚 5,用于检测变压器次级电流是否已经减小到零。当检测到过零信号,经过一定的延迟时间(1/4 谐振周期)后导通开关管,实现零电压导通。测试电路结构简图如图 3 所示。

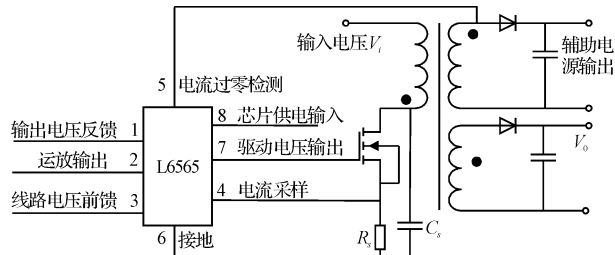


图 3 测试电路结构简图

电源主要参数如下:输出电压 48 V,输出功率 24 W,期望的效率达到 85% 以上, C_s 取 1 000 pF, L_p 为 30 μ H, V_{OR} 取 22 V。在不同的输入电压及负载功率下,工作频率的理论计算值和测试值如表 1 所示,开关管漏-源极电压波形如图 4 所示。

表 1 不同输入电压与负载下工作频率理论值与测试值

	30 W		24 W	
	理论值/kHz	测试值/kHz	理论值/kHz	测试值/kHz
24 V	56.1	57.97	69.5	71.84
30 V	76.6	76.08	94.7	92.83

从表 1 和图 4 中可以看出,工作频率的理论计算值与测试结果是一致的,且开关管导通时间的占空比均小于 50%,不需要另外再加斜率补偿。在相等的输入电压下,负载功率越小,工作频率越高;在相等的负载功率下,输入电压越高,工作频率越高;导通点开关管的漏-源极电压较小,实现了低开电压导通,降低了开关损耗;开关关断时的振铃现象是由变压器初级漏感与缓冲电容器振荡产生,已通过改进变压器绕线方法以及增加箝位电路的方法,抑制了尖峰。由于不可能完全消除变压器的漏感,只能一定程度上抑制尖峰,减小振铃幅度。

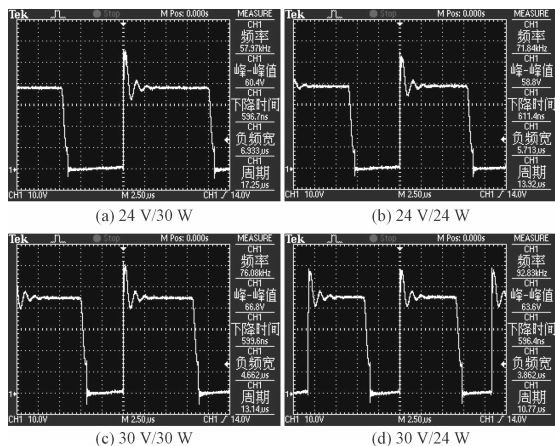


图 4 开关管漏极-源极间电压波形

4 结束语

本研究从准谐振零电压软开关反激式变换器的原理出发,分析了开关频率与电路参数之间的关系,推导出开关电源的工作频率,为电路后续的 EMI 滤波器设计、反馈回路频率补偿网络的设计奠定了基础。

参考文献 (References):

- [1] 滕妨华,张仲超. 准谐振软开关反激变换器的研究[J]. 电源技术应用,2003,6(1-2):9-11.
- [2] 王增福,李 昶,魏永明. 软开关电源原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
- [3] SHIROYAMA H, MATSUO H, ISHIZUKA Y. Quasi-resonant converter with divided resonant capacitor on primary and secondary side[C]//Telecommunications Energy Conference, 2009. INTELEC 2009. 31st International. Incheon:[s. n],2009:1-6.
- [4] SHIROYAMA H, MATSUO H, ISHIZUKA Y, et al. Analysis of the noise and efficiency characteristics in a quasi-resonant converter [C]//Telecommunications Energy Conference,2007. INTELEC 2007. 29th International. Rome:[s. n],2007:899-903.
- [5] 樊永隆. 如何确定准谐振反激式变换器设计的关键参数[EB/OL]. [2006-01-01] http://www.ed-china.com/ART_8800011046_400011_500002_TS_65bb21a0.HTM.
- [6] MANIKTALA S. 精通开关电源设计[M]. 王志强,译. 北京:人民邮电出版社,2008.
- [7] 周志敏,周纪海. 高频开关电源设计与应用实例[M]. 北京:人民邮电出版社,2008.
- [8] KOO G B, MOON S C, KIM J T. A new valley-detection method for the quasi-resonance switching[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE. Palm Springs, CA:[s. n],2010:540-543.
- [9] 汪 洋,林海青,常 越. 反激式准谐振开关电源工作频率确定及电源研制[J]. 电力电子技术,2005,39(3):92-94.
- [10] 陈永真,孟丽因. 高效率开关电源设计与制作[M]. 北京:中国电力出版社,2008.

[编辑:张 翔]