

ZCS在功率变换器中的分析及应用*

王京梅** 兰中文 王豪才

(电子科技大学信息材料工程学院 成都 610054)

【摘要】 对高频零电流软开关进行了理论分析,给出了开关中各参量的数学关系。通过对开关中能量传导的研究,得出了在一定条件下求解开关频率的近似公式。同时,探讨了零电流开关应用于开关电源中的特点与谐振参数的限制条件。对样机的测试表明,该分析对高频电源的设计具有指导意义。

关键词 零电流开关; 谐振开关; 功率变换; 开关损耗; 高频电源

中图分类号 TN86

开关电源自 60 年代出现以来,以其体积小、重量轻、效率高等优点得到迅速发展。在过去的几十年中,人们的研究重点一直放在 PWM 型开关电源上,它在几十到几百千赫兹的工作频率,有着良好的稳定性与性价比。但电子技术使当今许多电子设备日趋小型化、轻便化,因此,研究更为小巧高效,即更高功率密度的电源成为刻不容缓的任务。为了进一步提高开关电源的功率密度,提高电源的工作频率是必然的选择,因为在高的工作频率下,磁性器件与容性器件体积可显著减小。但在 PWM 工作方式下,高的工作频率意味着高的开关损耗。此外,开关元件在高电压、大电流下的开通和关断,将产生严重的 EMI 干扰,并经半导体元件的 Miller 电容耦合,进入控制电路,使电路稳定性恶化。因此,传统的 PWM 开关电源,一般只能工作在 500 kHz 以下,而进一步提高工作频率,必须改变开关电路的结构,这就是谐振型开关。本文主要研究零电流谐振型开关,它能有效降低开关元件的关断损耗,并对这种电路结构的工作原理作了描述,给出了主要元件上的工作波形与定时关系。同时,对这种电路结构在开关电源中的应用进行了探讨,给出了设计要点与功率开关控制要求,并依此分析设计并制作了一 ZCS-QRC 电源,给出了测试结果。

1 零电流开关的工作原理及时域分析

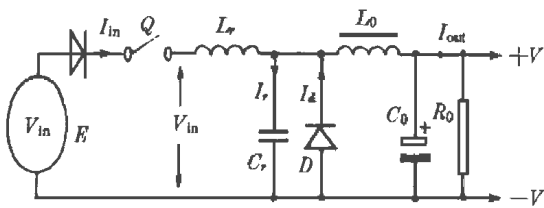


图 1 零电流开关原理示意图

给定初始状态如下:功率开关 Q 断开,电压源上不提供任何电流;谐振电流 i_r 为 0,在谐振元件 L_r 、 C_r 上的电压为 0;输出电压为 V_0 ,电流为 I_0 ,该能量全部由输出滤波元件 L_0 、 C_0 、 D 提供。同时为便于分析,设所有元件均为理想元件,如图 1 所示。其谐振回路的电压、电流关系如图 2 所示。

图中,在 t_0 时功率开关闭合,谐振回路被加上

大小为 V_{in} 的电压。即 $I_{in} = 0, I_{Cr} = 0, V_{Cr} = 0$

在 $[t_0, t_1]$ 期间, $I_{in} = (V_{in} / L_r)t, t \in [t_0, t_1], \Delta t_{10} = L_r(I_{out} / V_{in})$

©1996 年 11 月 27 日收稿
* 国防科工委预研基金资助项目
** 女 28 岁 硕士 助教

在 t_1 时,其 $I_{in} = I_{out}$,谐振元件 L_r 、 C_r 由零电流开始其谐振周期,此时, $k = 1/L_r C_r$; 谐振电流最大值 $I_{pk} = V_{in}/Z$,其中 $Z = \sqrt{L_r/C_r}$ 。其谐振电流和谐振电压分别为

$$i_r(t) = I_{pk} \sin kt = (V_{in} \sin kt)/Z \tag{1}$$

$$V_{cr}(t) = V_{in} [1 - \cos kt] \tag{2}$$

在 $1/2$ 谐振周期时,谐振电流 $i_r(t) = 0$,其输入电流再次与输出电流相等,此时刻为 t_2

在 $[t_1, t_2]$ 期间, $I_{in}(t) = I_{out} + (V_{in}/Z_r) \sin k(t - t_1)$, $t \in [t_1, t_2]$; $i_r(t) = (V_{in}/Z_r) \sin k(t - t_1)$, $V_{cr}(t) = V_{in} [1 - \cos k(t - t_1)]$

在 t_2 时, $I_{in} = I_{out}$, $\Delta t_{21} = 1/2f = \pi/k$, $i_r = 0$, $V_{cr} = 2V_{in}$ 。从 t_2 开始,谐振回路开始后半个谐振周期,即谐振电容开始放电,使流经谐振电感 L_r 的电流 (I_{in}) 以正弦波下降,直到 I_{in} 达到 0,该点为时刻 t_3

在 $[t_2, t_3]$ 期间, $I_{in}(t) = I_{out} + (V_{in}/Z_r) \sin k(t - t_1)$, $V_{cr} = V_{in} [1 - \cos k(t - t_1)]$, $t \in [t_2, t_3]$

在 t_3 时

$$I_{in} = 0 \quad \Delta t_{32} = (1/k) \sin^{-1} [I_{out} Z_r / V_{in}] \tag{3}$$

由式 (3) 可知, Δt_{32} 的长短与输出电流和输入电压有关,这要求控制回路能根据不同的出、入线条件,对功率开关 Q 进行控制,以期在零电流时关断。现假设在 t_3 时 Q 断开,则由 t_3 开始,谐振电容开始向负载放电,而谐振电感 L_r 上没有电流

在 $[t_3, t_4]$ 期间, $V_{cr}(t) = V_{cr}(t_3) - (I_{out}(t_3)/C_r)t$

在 t_4 时, $V_{cr} = 0$,则

$$\Delta t_{43} = C_r (V_{cr}(t_3) / I_{out}) \tag{4}$$

由 t_4 开始,输出电流将由输出滤波回路提供,回到初始状态,直至下一个变换周期开始

从上述分析可看出,其中只有 Δt_{21} 相对稳定,由谐振参数决定,其他均与输入电压及负载情况有关

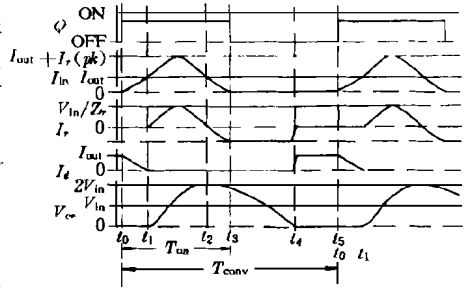


图 2 谐振回路中的电压、电流波形

2 ZCS-QRC 中的能量分析

在每一变换周期中,总是从输入源 E 中提取一部分能量并转换到输出负载,该能量以瓦秒计。其实质是电压 \times 电流 \times 持续时间。可以看出,当输入电压 V_{in} 恒定时,变换器所传输的能量可用电流 \times 时间,即电量来表示。本节将以分析电量 Q 的传导为基础,讨论在各种出入线条下为满足输出要求而必须满足的变换频率^[1]。

由上节分析可知,输入电流的波形可分为 4 个区域以简化计算,如图 3 所示。每个变换周期所传输的电量为该四部分的和。

1) Q_a 这部分电量传输发生在 $[t_0, t_1]$ 期间,其值为三角形区域的面积,且 $\Delta t_{10} = L_r (I_{out} / V_{in})$, 则

$$Q_a = \Delta t_{10} I_{out} / 2 = (L_r I_{out}^2) / 2V_{in} \tag{5}$$

2) Q_b 在半个谐振周期内,谐振回路所吸收的能量,其大小为半个谐振电流波形所覆盖的面积,且 $\Delta t_{21} = \pi/k$,则

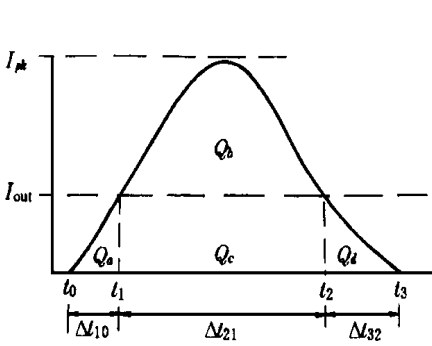


图 3 ZCS 中一个变换周期所传输的电量

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} (V_{in}/Zr) \sin k(t - t_1) dt =$$

$$(V_{in}/Zr) \int_{t_1}^{t_2} \sin k(t - t_1) dt =$$

$$2V_{in}/(Zrk) = 2V_{in}C \quad (6)$$

3) Q_c 这部分能量为 $[t_1, t_2]$ 期间, 由输入向输出直接提供的能量

$$Q_c = I_{out} \Delta t_{21} = (C I_{out})/k \quad (7)$$

4) Q_d 这部分能量传输发生在 $[t_2, t_3]$ 期间, 此时输入电流以正弦波形式减小至 0

$$Q_d = I_{out} \Delta t_{32} + I_{pk} \int_{t_2}^{t_3} \sin k(t - t_1) dt =$$

$$I_{out} \Delta t_{32} - (V_{in}/Zrk) [\cos \theta]_{t_2}^{t_3}$$

将 $\Delta t_{32} = (1/k) \sin^{-1}(I_{out} Zr/V_{in})$ 代入, 得

$$Q_d = (I_{out}/k) \sin^{-1}(I_{out} Zr/V_{in}) - V_{in} C r \{ \cos [\theta + \sin^{-1}(I_{out} Zr/V_{in})] - 1 \}$$

Q_d 可进一步近似为它所处的三角形面积

$$Q_d = I_{out} \Delta t_{32} / 2 = (I_{out}/2k) \sin^{-1}(I_{out} Zr/V_{in}) \quad (8)$$

至此, 可求出一个完整变换周期内, 由输入源所转换到负载的电量为

$$Q_t = Q_a + Q_b + Q_c + Q_d =$$

$$Lr I_{out}^2 / 2V_{in} + 2V_{in} C r + (C I_{out}/k) + (I_{out}/2k) \sin^{-1}(I_{out} Zr/V_{in}) \quad (9)$$

进一步简化计算, 可对式 (9) 作再次近似。研究图 3 可发现, Δt_{10} 与电流 I_{in} 所形成的面积和 Δt_{32} 与电流 I_{in} 所形成的面积是很接近的, 因此可考虑 $Q_a = Q_d$ 。这样, Q_t 的表达式可简化为

$$Q_t = 2Q_a + Q_b + Q_c = (Lr I_{out}^2 / V_{in}) + 2V_{in} C r + (C I_{out}/k) \quad (10)$$

由此可求出变换周期 T 应满足

$$Q_t V_{in} = E_{out}, E_{out} = V_{out} I_{out} T$$

其中 T 为包括功率开关工作时间在内的 ZCS-QRC 回路工作周期。由此可求出

$$T = Q_t V_{in} / V_{out} I_{out} = (V_{in} / V_{out} I_{out}) (2Q_a + Q_b + Q_c) =$$

$$(V_{in} / V_{out} I_{out}) [(Lr I_{out}^2 / V_{in}) + 2V_{in} C r + (C I_{out}/k)] \quad (13)$$

利用式 (13) 可近似求得各输入电压、输出电流下变换器所需满足的工作频率。

3 ZCS-QRC 下谐回路参数的限制

并非任意选取的 L 、 C 值都满足零电流关断的要求。很明显地, 当谐振电流 I_r 小于输出电流 I_{out} 时, 输入电流不可能到达零点。因此, 谐振回路的参数除了应满足谐振频率的要求外, 还受输入电压 V_{in} 与输出电流 I_{out} 的限制^[1,2]。最理想的情况是在最坏条件下, 即输入电压 V_{in} 降至下限, 输出电流 I_{out} 达到上限时, 谐振电流 $I_{pk}(\min) = V_{in}(\min)/Z$ 与输出电流 $I_{out}(\max)$ 相等。这样在其他任意出入线条件下, 将保证每一开关周期内输入电流达到零点。一般情况下, 考虑到器件参数的离散性及温度等的影响, 不可能按理想情况选取谐振参数, 根据文献, 常用的方法是选取 $I_{pk}(\min) = 1.2 I_{out}(\max)$ 。

4 120 W ZCS-QRC 电源实例

在以上分析的基础上,我们设计并制作了一台 120 W 的 ZCS-QRC 半桥型开关电源^[3],其最高工作频率为 1.05 MHz,谐振回路的自然频率为 1.25 MHz 对该电源进行测试,结果表明在 1 MHz 的工作频率下其表现令人满意,具体测试结果如表 1 2 所示

表 1 输入电压对开关频率的影响

输入电 压 V_{in}/V	工作频率 /kHz	
	实测值	计算值
175	925	915
190	850	811
205	767	721
220	705	647
235	610	581

表 2 输出电流对开关频率的影响

输出电 流 I_{out}/A	工作频率 /kHz	
	实测值	计算值
2.5	308	276
4	410	403
5.5	515	508
7	640	595
8.5	720	670

参 考 文 献

- 1 Asoka K S Bhat. Analysis and design of a series-parallel resonant converter. IEEE Tran Power Elec-
tron, 1992, 8: 81-89
- 2 Celal Tanju M, Praveen K Jain. High-performance ac/dc converter for high-frequency power distribu-
tion systems analysis, design considerations and experimental results. IEEE Trans Power Elec-
tron, 1994, 9: 275-280
- 3 Andrew F, Goldberg John G, Kassakian Martin F Schlecht. Issues related to 1~ 10 MHz transformer
design. 18 th IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1987

Analysis and Application of ZCS in SMP

Wang Jingmei Lan Zhongwen Wang Haocai

(Institute of Information Materials Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract In this paper, ZCS(zero current switch) worked in high frequency is studied. The mathematical relationships of every parameter in the switch are given. By analyzing the energy transfer in the switch, the approximate fomula are got to find out the work frequency under a certen condition. Mean while, the characteristics of its application and some restriction of the resonant parameter are discussed. Finally, the measured data of the experiment indicates that the analysis is close to reality.

Key words zero current switch; resonant switch; power converter; switch loss; high frequency power supply

编辑 徐安玉 黄 辛