

一种自激式反激变换器的分析和设计

顾元强, 尹斌, 吴海新, 王先永
河海大学电气工程学院, 南京 (210098)

E-mail: guyq2005@163.com

摘要: 自激式反激变换器 (通常指 RCC) 电路简单, 成本低廉, 广泛应用于 100W 以下的小功率开关稳压电源。本文详细介绍了 RCC 电路的工作原理和设计方法。

关键词: RCC, 自激, 反激变换器

1. 引言

自激式反激变换器, 通常称为 RCC 电路 (ringing choke converter), 出现在稳压电源 IC 之前, 可实现最简单的开关稳压器。基于 RCC 方式的开关稳压器不需要外部时钟, 通过变压器和开关晶体管就可实现振荡功能, 只需少数分立器件就可以获得专用芯片才能实现的输出性能, 通过良好的设计可获得高效可靠的工作^[1]。

RCC 变换器总是工作于边界连续状态(DCM/CCM),采用峰值电流控制模式。由于要维持其边界连续模式, 并且原边电流上升斜率受输入电压影响, 因此工作频率和占空比均受输入电压和输出电流的控制, 在高输入电压和轻载时频率较高^[2]。

2. 电路工作原理分析

RCC 方式的本质即为反激变换器, 图 1 给出实际应用最多的 RCC 方式的基本电路图。为简化稳态分析, 可做如下近似^{[2][3]}:

- (1)、忽略变压器漏感对主管 Q_1 的集射极电压 V_{CE} 的影响, 实际使用时需要 RCD 箝位;
- (2)、主电路输出电容足够大, 输出绕组电压箝位于输出电压 V_O ;
- (3)、稳态时电容 C_3 上的电压保持不变;
- (4)、稳态时电阻 R_g 的作用可以忽略。

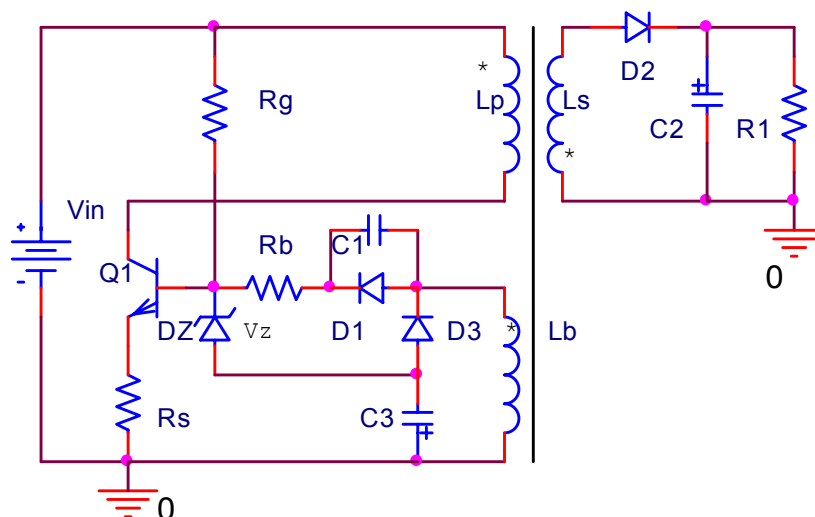


图 1 RCC 基本电路图

下面分析其工作过程^[1]

2.1 电路的起动

接通输入电源 V_{IN} 后, 电流 i_g 通过电阻 R_g 流向开关晶体管 Q_1 的基极, Q_1 导通, i_g 称为起动电流。在 RCC 方式中, 晶体管 Q_1 的集电极 I_C 必然由零开始逐渐增加, 因此 i_g 应尽量小一点。

2.2 开关晶体管处于 ON 状态时

一旦 Q_1 进入 ON 状态, 输入电压 V_{IN} 将加在变压器的初级绕组 N_p 上。由匝比可知, 基极线圈 N_B 上产生的电压为 $V_B = (N_B / N_p) V_{IN}$, 该电压与 Q_1 导通极性相同, 为正反馈电压, 其作用是使开关晶体管进一步迅速导通。因此 V_B 将维持 Q_1 的导通状态, 此时基极电流

I_B 是连续的稳定电流,
$$I_B = \frac{(N_B / N_p) V_{IN} - (V_{D1} + V_{BE})}{R_B}$$
 (忽略 R_S 上的压降, 下同)。此时

变压器二次绕组上感应电压为反向电压, 整流二极管 D_2 截止, 二次绕组中无电流通过。若一次绕组电感为 L_p , 导通时间为 t , Q_1 集电极电流 I_C 线性增长, $I_C = V_{IN} * t / L_p$ 。

随着 I_C 的增加, 当 $I_C \geq I_B * h_{FE}$ 时, 晶体管退出饱和状态, V_{CE} 随之增大, 变压器一次绕组电压下降, 反馈绕组感应电压下降, 基极电流 I_B 进一步减小, 基极电流不足, 开关管迅速截止。

2.3 开关晶体管处于 OFF 状态时

晶体管从导通到截止瞬间, 根据磁通连续性定理, 磁场的方向和大小都保持不变, 因此, 要与一次绕组中流经的电流保持同样的安匝数, 二次绕组电压反向, 使二极管导通, 由等式 $I_{1P} * N_p = I_{2P} * N_s$ 知导通瞬间电流 $I_{2P} = I_{1P} * N_p / N_s$ 。

设输出电压 V_O , 整流二极管压降 V_{D2} , 二次绕组电感 L_s , 则二次绕组电压 $V_s = V_O + V_{D2}$, 二极管电流以 V_s / L_s 的速率下降, 同时变压器电感中储存的能量供给输出端。

2.4 开关管再次导通

变压器中的能量全部转移到输出端, 则整流二极管 D_2 的电流变为 0 截止, 此瞬间变压器各绕组电压也变为 0, 启动电阻 R_g 中部分电流变为开关管基极电流, 在正反馈作用下再次导通。

2.5 稳压原理

RCC 电路是一种非固定周期的开关电源, 它不是由占空比连续变化的 PWM 控制信号来驱动。当输出电压超过额定值时, 开关管提前关断, I_{1P} 峰值电流减小, 反激变压器储能下降, 变换器输出电压降低; 当输出电压低于额定时, 开关管延迟关断, I_{1P} 峰值电流升高, 变压器储能增加, 变换器输出电压上升, 完成输出稳压调整过程。

要使晶体管关断, 只要使基极的驱动电流不足即可 (相对于集电极电流而言), 因此, 可以用稳压管 D_z 来分流。 D_z 的阳极与电容器 C_3 的阴极相连。在 Q_1 OFF 期间, N_B 线圈通

过导通的 D_3 为 C_3 充电, C_3 的电压变为负电压, D_Z 的齐纳电压 V_Z 为: $V_Z = V_C + V_{BE}$, 如果输出电压上升, C_3 的端电压 V_C 也随输出电压 V_O 成正比上升, 于是齐纳二极管 D_Z 导通, 驱动电流从它所形成的旁路流过, 进而使 Q_1 OFF。此间 N_B 线圈和 N_S 线圈的电压值分别与匝数成正比, 即 $V_C = \frac{N_B}{N_S}(V_O + V_{D2}) - V_{D3}$, 反之也可改变 V_C 使 V_O 随之改变。因此由 V_Z 、

N_S / N_B 即可确定输出电压 V_O 。即输出电压为 $V_O = \frac{N_S}{N_B} \cdot (V_Z - V_{BE} + V_{D3}) - V_{D2}$, 若忽略 V_{BE} 、 V_{D2} 和 V_{D3} , 则 V_O 与 V_Z 成正比, 且输出电压的精度由电压 V_Z 的精度确定。

3. RCC 电路设计方法

RCC 电路的设计包括功率主电路设计和控制电路的设计。下面结合一 24V/3A 的电源实例说明其设计步骤。

主要技术参数: (1) 输入电压 AC:220V \pm 10%, 频率: 50Hz; (2) 输出: 电压 24V, 电流 3A; (3) 稳压精度: 5%; (4) 工作效率 >75%。

3.1 变压器参数计算

设计中按最低输入电压、最大输出电流计算, 此时振荡频率最低, 取为 50k, 占空比 $D=0.4$ 。

最低输入直流电压:

$$V_{IN(\min)} = 220 \times (1-10\%) \times \sqrt{2} \times 0.9 = 252V$$

变压器电感及匝数的计算:

$$i_{1P} = \frac{2i_{1(ave)}}{D} = \frac{2P_O}{D\eta V_{IN(\min)}} = \frac{2 \times 24 \times 3}{0.4 \times 0.75 \times 252} = 1.90A$$

N_P 线圈的电感 L_P 为:

$$L_P = \frac{V_{IN(\min)}}{i_{1P}} t_{on} = \frac{252}{1.90} \times 8 \times 10^{-6} = 1.06mH$$

次级线圈电压:

$$V_S = V_O + V_{D2} = 24 + 0.7 = 24.7V$$

由变压器的伏秒平衡可得:

$$V_{IN(\min)} DT = \frac{N_P}{N_S} V_S (1-D) T$$

从而得到匝数比:

$$N_{PS} = \frac{N_P}{N_S} = \frac{V_{IN(\min)} D}{V_S (1-D)} = \frac{252 \times 0.4}{24.7 \times 0.6} = 6.8$$

由于动作频率较低且输出功率很低, 故采用的磁芯为 TDK 生产的材质为 H_{35} 的 EI40。一次线圈匝数:

$$N_P = \frac{V_{IN(\min)} t_{on}}{\Delta B \cdot A_e} \times 10^8 = \frac{252 \times 8 \times 10^{-6}}{2800 \times 1.48} \times 10^8 = 49$$

二次线圈匝数： $N_S = N_P / N_{PS} = 49 / 6.8 = 7.2$ 取 8 匝。

基极绕组匝数 N_B ：设最低输入电压 $V_B = 6V$ ，

$$N_B = \frac{6}{252} \times 49 = 1.17 \quad \text{取 1 匝}$$

变压器间隙：

$$l_g = 4\pi \cdot \frac{A_e \cdot N_P^2}{L_P} \times 10^{-8} = 4\pi \frac{1.48 \times 49^2}{1.06 \times 10^{-3}} \times 10^{-8} = 0.42 \text{mm}$$

实际的间隙纸板厚度为 l_g 的一半，即为 0.21mm。

3.2 稳压电路的设计

首先，当 Q_1 处于 OFF 时，线圈 N_B 的电压 V_B' 为

$$V_B' = \frac{N_B}{N_S} \cdot V_S = \frac{1}{8} \times 24.7 = 3.1V$$

作为电压控制用的齐纳二极管 D_Z 两端的电压 V_Z 为：

$$V_Z = V_B' + V_{BE} - V_{D3} = 3.1V$$

由于变压器本身也有压降，因此实际应用的电压值稍高一些的二极管，可取 3.3V。

3.3 驱动电路设计

当输入电压最高时， Q_1 集电极电压最高值 V_{CE} 为

$$V_{CE} = V_S \cdot N_{PS} + V_{IN(\text{MAX})} = 24.7 \times 6.8 + 248 \times \sqrt{2} \times 0.9 = 484V$$

考虑到变压器漏感引起的浪涌电压，因此采用高速、高压开关晶体管 2SC3460。设 $I_C = 1.9A$ 时，考虑一定的余裕， h_{FE} 取 10，必须的基极电流 I_B 约为 0.19A。于是基极电阻 R_B 为：

$$R_B = \frac{V_B - (V_{BE} + V_{D1})}{I_B} = \frac{(1/49) \times 252 - (0.7 + 0.7)}{0.19} = 27\Omega$$

起电流有 1mA 就足够了，因此起电阻为： $R_g = V_{IN(\min)} / i_g = 252 / .001 = 252k\Omega$ ，实际取 240k。

基极电阻 R_B 与变压器线圈 N_B 之间连接的电容器 C_1 的目的是加速 Q_1 的基极电流，改善电流的起特性。该电路中，采用 0.0047u 的薄膜电容器

4. 设计电路的仿真

在上文分析的基础上，运用 OrCAD PSpice9.2 建立电路图，进行仿真、调试，仿真波形如图 2—图 4 所示（ $R_1 = 8$ 欧姆）。

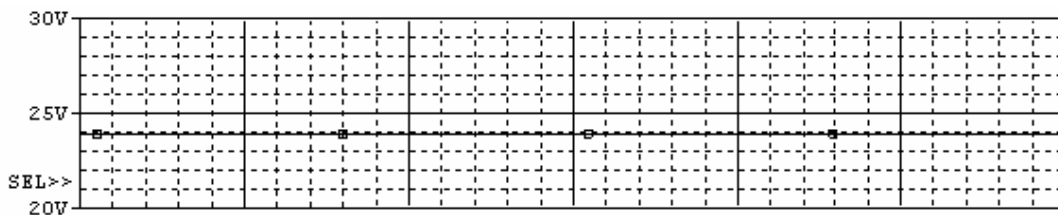


图 2 输出电压 V_o 波形

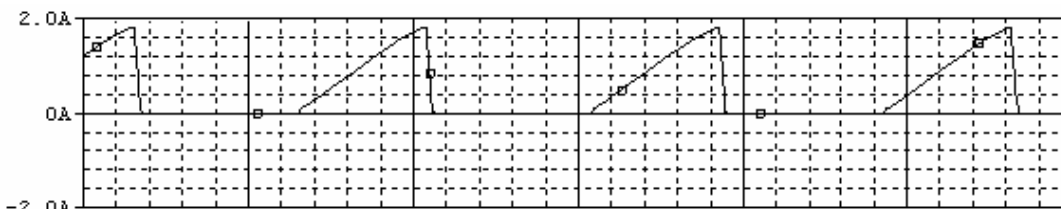


图 3 Q_1 集电极电流 I_c 波形

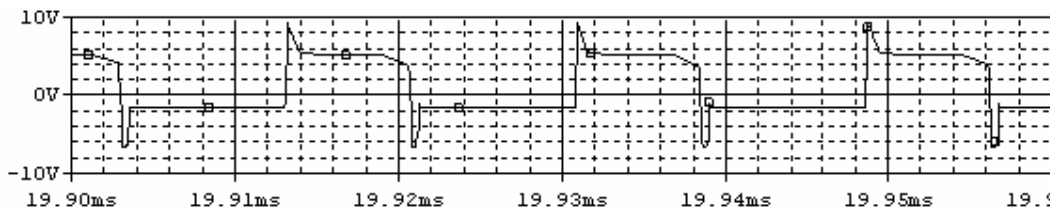


图 4 R_b 上驱动电压波形

从仿真波形可以看出，电路工作周期 $T=19\mu s$ ，开通时间 $T_{ON}=7.9\mu s$ ，占空比 $D=7.9/19=41.6\%$ ；输出电压 $V_o=23.95V$ ，误差 $e=(24-23.95)/24=0.2\%$ ，满足设计要求。

5. 总结

本文对 RCC 变换器进行原理分析并结合实例给出了设计方法，最后对所设计的电路进行了仿真验证。需要注意的是，由于各器件都不是理想的，在实际设计中必须考虑各种近似带来的影响。

参考文献

- [1] 户川治郎. 实用电源电路设计[M]. 北京: 科学出版社, 2006
- [2] 樊晓东. RCC 电路原理分析与设计[J]. 电源世界, 2007.1:20-22
- [3] Brian T. Irving and Milan M. Jovanović. Analysis and Design of Self-Oscillating Flyback Converter [J], IEEE Applied Power Electronics Conf. (APEC)Proc., pp.897-903, March 2002.

Principle and Design of Self-Oscillating flyback converter

Gu Yuanqiang, Yin Bin, Wu Haixin, Wang Xianyong
College of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing (210098)

Abstract

The self-oscillating fly back converter (often referred to as RCC) is widely used in low-power regulated switching power supply due to its simplicity and low component count. This paper presents a detailed principle analysis and design guidelines of RCC.

Keywords: RCC, self-oscillating, fly back converter