

文章编号 1000-5013(2003) 01-0027-06

# 开关整流推挽变换电子镇流器

杨毅明

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362011)

**摘要** 介绍一种新的荧光灯电子镇流器. 它运用单个开关将整流器和推挽变换器结合在一起, 向荧光灯提供高频电源的同时, 使输入电流与电网电压同波形同频率同相位, 具有功率因数高和电路简单的优点. 该电路利用电子开关和反向变换器使输入电流连续工作, 保证电源电流的正弦性和同相位. 同时, 推挽变换器能够向荧光灯提供高频电源, 启动时自动升压, 正常工作时自动限流, 实现线路的高功率因数和荧光灯的高效率.

**关键词** 开关整流器, 推挽变换器, 谐振, 功率因数

**中图分类号** TM 461. 302

**文献标识码** A

低功率因数和谐波是电力系统的大敌. 由于照明用电在电器中所占的比例很大, 所以提高照明用电的效率很重要. 荧光灯的效率比白炽灯高, 我国接入电网的电磁镇流器荧光灯非常普遍, 它功率因数低的缺点降低了电网的质量. 电子镇流器工作在超音频的频率, 具有效率高、启动电压低、无噪声、无闪烁等优点, 但它会对电网产生严重的谐波污染. 在发达国家, 对用电质量的要求日益严格, 对功率因数的校正和要求也急剧增加<sup>[1~3]</sup>. 功率因数高可以减少线电流的有效值和线电流的谐波畸变, 使公共线路能更有效地使用. 本文介绍的电子镇流器具有很好的功率因数校正功能. 它的开关整流器工作为不连续导电模式, 使功率因数达到 1, 推挽变换器提供荧光灯高频电源. 以往电子镇流器的电源变换需要两级电路, 一级是频率变换, 另一级是功率因数控制. 而本文的电路只用单级电源变换, 就可以使输入功率因数为 1, 并产生高频电灯电流.

## 1 电路结构和工作原理

电子镇流器的电路, 如图 1 所示. 它的基本电路由桥式整流器 VD1~VD4, 反向变换器 T<sub>1</sub>, 电源开关管 VT, 续流二极管 VD<sub>5</sub>, 开关电容 C<sub>6</sub>, 推挽变换器 T<sub>2</sub>, 谐振电路 L<sub>4</sub>, C<sub>7</sub>, C<sub>8</sub> 和荧光灯等组成. 电路中 C<sub>1</sub> 和 L<sub>1</sub> 组成电磁干扰滤波器, R<sub>4</sub> 和 C<sub>5</sub> 组成场效应管保护网络. L<sub>4</sub>, C<sub>7</sub> 和 C<sub>8</sub> 组成的串联谐振回路有点燃荧光灯, 限制荧光灯的工作电流和消除输出电流的高次谐波成分的作用. 电源开关管 VT 的工作频率约 47 kHz, 用恒定导电时间的方式控制. 该电路按工作原理可分为开关整流电路和推挽变换电路两部分. 开关整流电路由桥式整流器、滤波电容 C<sub>2</sub>、反

向变换器、开关管和开关电容等组成,而推挽变换电路由推挽变换器、谐振电路和荧光灯等组成

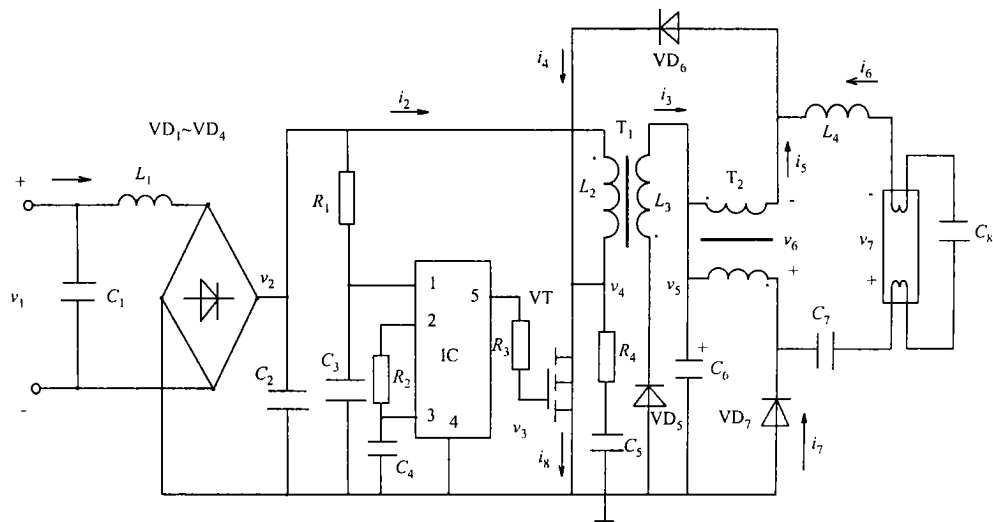


图 1 电子镇流器电路图

成. 反向变换器的初级线圈  $L_1$  与开关  $VT$  配合, 可使整流二极管的导通角达到  $180^\circ$ ; 使输入电源电流追逐电源电压的变化. 次级线圈  $L_3$  根据电磁感应定律, 将  $L_2$  等能量反相传给后面的推挽变换器. 镇流器的工作周期可分为 3 个阶段, 如图 2 所示.

(1) 在开关管  $VT$  导通 ( $0 \sim t_1$ ) 时, 整流滤波的电源  $v_2$  全部落在反向变换器的初级  $L_2$  上, 使其电流  $i_2$  线性增长. 它的次级  $L_3$  感生的电压使开关二极管  $VD_5$  反偏截止. 这时开关二极管  $VD_6$  因开关  $VT$  导通而导通, 开关电容  $C_6$  上的电压  $v_5$  直接加在推挽变换器  $T_2$  和谐振电路上, 电容  $C_6$  的电压  $v_5$  使  $T_2$  上端线圈的电流  $i_5$  增加, 它感应  $T_2$  下端线圈的电压, 使荧光灯流过正电流. (2) 在开关  $VT$  截止 ( $t_1 \sim t_2$ ) 时, 反向变换器的次级感生反向电压使  $VD_5$  导通, 把  $T_1$  存储的磁能向电容  $C_6$  充电. 同时因二极管  $VD_6$  截止, 推挽变换器  $T_2$  下端线圈的磁感应电压使开关二极管  $VD_7$  导通,  $T_2$  磁芯的储能也向  $C_6$  充电. 并且, 推挽变换器  $T_2$  的感应电压  $v_6$  让磁能释放, 使荧光灯流过负电流. (3) 在开关管  $VT$  截止 ( $t_2 \sim T$ ) 时, 推挽变换器  $T_2$  下端线圈的电压因磁能的泄放而降低到电压  $v_5$  后, 二极管  $VD_7$  截止, 推挽变压器  $T_2$  的上下两个线圈继续与荧光灯构成通路. 磁芯的储能继续向荧光灯供电, 直至磁能泄尽. 这时电流还是负的. 这样, 通过 3 个阶段的快速重复, 线电流  $i_1$  得到了调整, 谐振电路就得到了高频电压  $v_6$ .

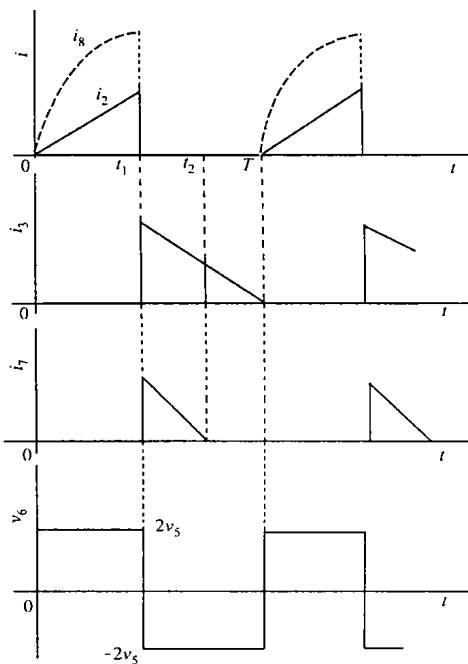


图 2 电流电压波形示意图

## 2 基本参数计算和说明

该电路的特性可用输入电流、输出功率、占空比、功率因数和总谐波量来描述. 反向变换器  $T_1$  的输入电流  $i_2$  的波形, 如图 2 所示. 其峰值为

$$I_{2m} = \frac{t_1}{L_2} v_2, \quad (1)$$

根据占空比的定义  $D = t_1 / T$ , 把上式变为

$$I_{2m} = \frac{D}{L_2 f_1} v_2, \quad (2)$$

式中  $v_2 = |v_1| = |V_m \sin 2\pi f t|$  是整流器  $VD_1 \sim VD_4$  的输出电压,  $V_m$  是电网电压的峰值,  $f$  是电网电压的频率,  $f_1$  是开关电源的频率. 如果从电网频率的角度看, 根据  $f \ll f_1$ , 容易求出反向变换器的输入电流  $i_2$  在一个开关周期的平均值. 即

$$I_2 = \frac{D^2}{2L_2 f_1} v_2. \quad (3)$$

式(3)说明, 镇流器的输入电流  $I_2$  的变化规律同电网电压  $v_1$  一样, 也是正弦波, 而且同频率同相位, 如图3所示. 所不同的是,  $I_2$  是整流后的直流电,  $v_1$  是交流电. 由于  $i_2$  是断续的,  $I_2$  只是从电网频率看  $i_2$  的平均值. 为了保证电网输入电流  $i_1$  的变化与  $I_2$  相同, 在整流器  $VD_1 \sim VD_4$  的输出端接上滤波电容  $C_2$ . 它的值不大, 正好弥补开关 VT 截止时反向变换器输入电流的起伏, 使位移因数 ( $\cos\theta$ ) 为 1<sup>[8]</sup>. 这样整个电路的输入功率为

$$P_i = V_1 I_1 = \frac{V_m^2 D^2}{4L_2 f_1}. \quad (4)$$

根据输出功率的定义式  $P_o = \eta P_i$ . 式中,  $\eta$  表示效率. 可得输出功率为

$$P_o = \frac{V_m^2 D^2}{4L_2 f_1} \eta. \quad (5)$$

在已知  $P_o$ ,  $D$  和  $f_1$  的情况下, 根据式(5)可以确定

$L_2$ . 为了得到占空比的表达式, 可以先求出在不连续导电模式下的最大占空比. 这里必须考虑反向变换器的初次级电感. 由式(2)可得, 反向变换器的初级电流最大值为

$$I_{2max} = \frac{V_m D_{max}}{L_2 f_1}. \quad (6)$$

若选择电容  $C_6$  的值, 使其大到它在充电期和放电期的电压不变. 则由能量守恒关系, 可得反向变换器的次级电流  $i_3$  最小值为

$$I_{3min} = \frac{N_2}{N_3} I_{2max} - \frac{V_5(1 - D_{max})}{L_3 f_1} = 0. \quad (7)$$

上式中的  $N_2 / N_3$  是反向变换器的匝数比. 根据它与初次级电感  $L_2, L_3$  的关系, 可以求出最大占空比为

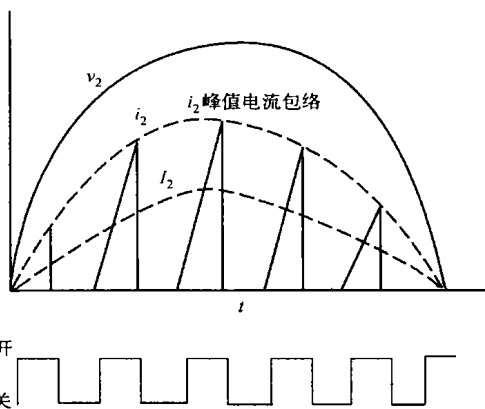


图 3 反向变换器电流电压示意图

只要占空比  $D$  不超过式(8), 反向变换器就可以工作在不连续导电模式下。

电路中关键元件的电流电压值是设计电路的依据, 它们由下面的关系式确定。因为加在开关管 VT 上的电压为

$$v_4 = (N_2/N_3)V_5 + v_2. \quad (9)$$

由  $v_2 = |V_m \sin 2\pi f_1 t|$  可知, 当  $\sin 2\pi f_1 t = \pm 1$  时, 加在开关管上的电压最大。即

$$V_{4m} = (N_2/N_3)V_5 + V_m. \quad (10)$$

二极管 VD<sub>6</sub> 的电流  $i_4$  因含有谐振电路的电流  $i_6$  部分, 而具有部分正弦性质。其峰值电流为

$$I_{4m} = I_{5m} + I_{6m}. \quad (11)$$

开关管 VT 的电流  $i_8 = i_2 + i_4$ , 在它导通期间也具有正弦性质。这点从图 2 可以看出。所以, 根据式(2), 可得开关的最大峰值电流为

$$I_{8m} = \frac{V_m D}{L_2 f_1} + I_{4m}. \quad (12)$$

桥式整流器的输入电流  $i_1$  与反向变换器的输入电流近似相同。为了安全可靠, 令桥式整流器的峰值电流为

$$I_{1m} = \frac{V_m D}{L_2 f_1}. \quad (13)$$

### 3 电路谐振特性

该电路的谐振特性可以分成两个阶段来考虑, 一个是启动阶段, 另一个是稳定阶段。这样分析荧光灯的动态特性, 所得的谐振参数可作为选取元件参数的依据。在荧光灯启动阶段, 灯管相当于开路。这时要求谐振电路  $C_7$ ,  $C_8$  和  $L_4$  的谐振频率  $f_2$  接近开关频率  $f_1$ 。它可以使启动电流获得最大值, 让荧光灯两端的电压  $v_7$  能自动攀升到启动电压。为了安全起见, 最大启动电流不能超过 5 倍的荧光灯额定电流。为了符合这些启动条件, 在启动阶段串联谐振电路上的电流  $i_6$ , 可用暂态公式描述为

$$i_6 = \frac{2\omega V_5}{L_4(\omega_2^2 - \omega^2)} (\cos \omega t - \cos \omega_2 t). \quad (14)$$

式中  $\omega = 2\pi f_1$  和  $\omega_2 = 2\pi f_2$ , 它说明灯电流有可能达到最大值。即

$$I_{6m} = \frac{4\omega V_5}{L_4(\omega_2^2 - \omega^2)}. \quad (15)$$

这个电流使荧光灯的点燃电压  $v_7$  最大, 即

$$V_{7m} = I_{6m} / (\omega C_8), \quad (16)$$

启动阶段电路的谐振频率

$$\omega = \frac{\sqrt{C_7 + C_8}}{C_7 C_8 L_4} \omega. \quad (17)$$

在荧光灯稳定阶段, 因为灯管已经导通, 相当于一个小阻值电阻, 减小了电容  $C_8$  的作用, 相应地提高了串联谐振回路的等效电容。所以, 这时谐振电路的谐振频率  $\omega$  比启动时下降, 小于开关频率  $\omega$ 。谐振电路的  $Q$  值低, 谐振网络  $C_7$  和  $L_4$  处于失谐状态, 起到限流和消除负载电流中

高次谐波的作用. 为了满足稳定阶段的条件, 选择稳定阶段电路的谐振频率  $\omega$  比启动阶段的谐振频率  $\omega$  小 3 倍. 根据稳定阶段谐振电路的导通情况, 得稳态谐振频率为

$$\omega = \frac{1}{L_4 C_7}. \quad (18)$$

再利用式(17), (18)的关系, 可得谐振电容的关系为

$$C_7 = 15C_8. \quad (19)$$

根据式(15) ~ 式(19)可以推导出

$$L_4 = \frac{(C_7 + C_8)I_{6m} - 4\omega V_5 C_7 C_8}{I_{6m} C_7 C_8 \omega^2}, \quad (20)$$

$$C_8 = \frac{I_{6m}}{\omega V_{7m}}. \quad (21)$$

根据以上分析, 可以确定开关整流推挽变换电子镇流器的元件数值.

## 4 试验结果和分析

本文根据电网电压(220 V, 50 Hz)的输出功率为 40 W、电子开关频率为 47 kHz、荧光灯额定电流等于 0.4 A、效率等于 81%、占空比等于 0.45 等电路指标, 进行电子镇流器试验. 它的主要元件参数, 回扫变压器匝数比是 100/38, 推挽变压器匝数比是 100/100, 场效应管是 IRF830, 驱动器 IC 是 IR2151 高压高速自振荡 MOS 栅极半桥驱动器, 整流二极管是 1N4007, 开关二极管是 1N4004. 其它元件的参数, 如图 1 所示.

对电路的试验可观测到, 输入电压和电流的波形整体上是相同的, 而且是同相位的, 如图 4 所示. 电压电流的区别在于, 电压的波形是一条细线条, 而电流的波形像一条粗麻绳, 即正弦波上连续地排列了许多小幅度高频脉冲. 它们是开关管 VT 控制电感  $L_2$  断续导通的结果. 图 4 说明该电子镇流器的功率因数很高. 虽然加在谐振电路上的电压是 47 kHz 的高频矩形波, 但荧光灯上的负载电压和电流都是正弦波. 它们按 47 kHz 频率同相变化, 波形

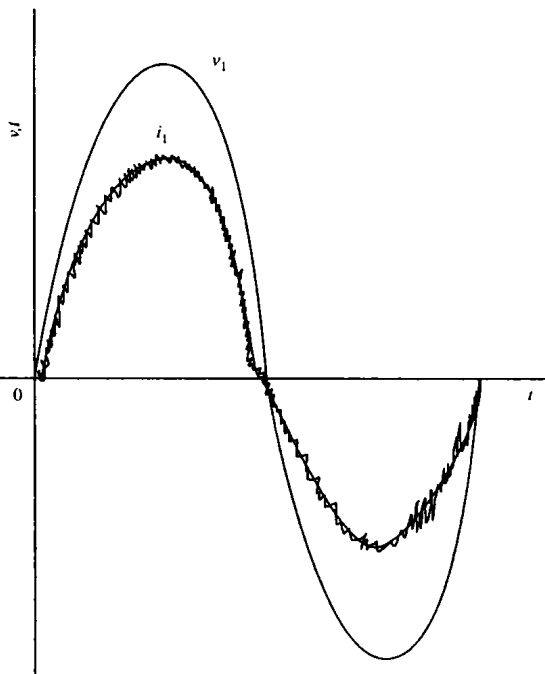


图 4 电网电压电流示意图

与图 4 相似. 这是因为稳定状态时, 失谐电路相当于低通滤波器和荧光灯, 等效为一个纯电阻, 电流波形上叠加的纹波脉冲是一些泄漏的高次谐波所至. 开关管 VT 上的电流  $i_8$ 、二极管 VD7 上的电流  $i_7$ , 还有回扫变压器的初级和次级的电流  $i_2$  和  $i_3$  等波形与图 2 所示波形及其相似. 不同的是它们都有一些小纹波脉冲. 加在电容  $C_6$  上的电压  $v_5$  基本不变, 使电网电压的纹波不能影响荧光灯的光通量. 试验测得电路的效率是 85%, 功率因数是 0.99, 总谐波 THD 是 7%. 从

图 4 看, 输入电流的高频谐波可由整流滤波电容  $C_2$  得到缓解.  $C_2$  的取值不能太大, 否则会减小整流二极管的导通角.

## 5 结束语

由于该电子镇流器采用单级能量转换, 因此它的电路简单、效率高和功率因数高, 可以降低电路成本. 它的两级变换器共用一个电源开关. 首先, 电源开关控制整流器工作在不连续导通方式下, 使线电流跟随输入电源电压的正弦波变化, 实现线路的高功率因数. 其次, 电源开关控制推挽变换器有效地为荧光灯提供所要求的启动电流和工作电流. 理论分析和试验都说明该方案的正确性, 它为荧光灯的应用提供了一种新型的参考电路.

## 参 考 文 献

- 1 毛兴武, 祝大卫. 电子镇流器原理与制作[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1999. 1~8
- 2 郑耀林. 复合方式半桥型逆变器的动作特性[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2002, 23(1): 77~80
- 3 Licitra C, Malesani L, Spiazzi G, et al. Single-ended soft-switching electronic ballast with unity power factor[J]. IEEE Trans. Ind. Applicat., 1993, 29(2): 382~388
- 4 杨毅明. 无电流传感器的电流控制调宽式开关整流器[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2002, 23(1): 23~27

# An Electronic Ballast Formed by Using Switch to Integrate the Rectifier with a Push-Pull Converter

Yang Yiming

(College of Info. Sci. & Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou, China)

**Abstract** A new electronic ballast for the use of fluorescent lamp is presented. The ballast is formed by ingeniously using a single switch to integrate the rectifier with a push-pull converter. It provides fluorescent lamp with power source of high frequency; and makes input current and voltage of electric network similar in waveform and frequency and phase. It is high in power factor and simple in circuit. Its circuit makes input current to work continuously by applying electronic switch and flyback converter; and ensures the current of power source to be sinusoidal and similar in phase. Its push-pull converter is able to provide fluorescent lamp with power source of high frequency; and to raise the voltage at starting and to limit the current during normal work automatically. It realizes the high power factor of circuit and high efficiency of fluorescent lamp.

**Key words** switching rectifier, push-pull converter, resonance, power factor