

## 反激变换器不同工作模式时的稳态分析与设计\*

张兰红<sup>1</sup>, 陈道炼<sup>2</sup>

(盐城工学院 电气工程系, 江苏 盐城 224003 2. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

**摘 要:** 分析了反激变换器在电感电流连续模式(CCM)、临界连续模式、断续模式(DCM)时的稳态原理, 得出 DCM 和 CCM 模式反激变换器分别具有类似于电流源和电压源外特性的结论。比较了 CCM 和 DCM 模式反激变换器的工作情况, 指出根据负载选择工作模式的方法。详细地介绍了反激变换器中储能式变压器的设计方法, 进行了反激变换器原理样机的设计与试验, 试验结果与理论分析一致。

**关键词:** 反激变换器; 工作模式; 外特性; 稳态分析

中图分类号: TM423

文献标识码: A

文章编号: 1671-532X(2002)04-0005-04

反激变换器具有电路拓扑简洁, 输出与输入电气隔离, 输入电压范围宽, 可多组输出, 成本低, 可靠性高等优点, 广泛应用于中小功率变换场合。反激变换器具有电感电流连续(CCM)、临界连续与断续(DCM)3种工作模式。反激变换器中隔离变压器兼作储能电感用, 设计较为困难。本文在对反激变换器不同工作模式原理进行分析的基础上比较了它们的工作情况, 总结出反激变换器中电路参数的设计方法, 详细地介绍了储能式变压器的设计方法, 设计并研制了开关频率为 300 kHz 的反激变换器原理样机。

## 1 反激变换器稳态原理特性

反激变换器电路拓扑, 如图 1 所示。它由储能式变压器 T、开关管 S、整流二极管 D 和滤波电容  $C_f$  组成。根据电感电流是否连续可将反激变换器分成电感电流连续模式(CCM)、临界连续模式与断续模式(DCM)。不同模式时电感电流波形, 如图 2 所示。

CCM 模式, 副边电感电流  $i_2$  在开关管 S 截止期间未下降到零, 输出电压  $U_o$  及输入电流峰值  $I_{1p}$  为<sup>[1]</sup>:

$$U_o = \frac{N_2}{N_1} \frac{D}{1-D} U_i \quad (1)$$

$$I_{1p} = \frac{P_o}{U_i \eta D} + \frac{U_i T}{2L_1} D \quad (2)$$

式中  $N_1$ —变压器原边绕组匝数;

$N_2$ —变压器副边绕组匝数;

$T$ —变换器开关周期;

$D$ —开关管 S 的占空比,  $D = T_{ON}/T$ ;

$P_o$ —输出功率;

$\eta$ —变换效率。

DCM 模式,  $i_2$  在 S 截止期间已下降到零, 此时

$$U_o = \frac{U_i^2 D^2 T \eta}{2L_1 I_o} \quad (3)$$

$$I_{1p} = \frac{2P_o}{U_i \eta D} = \frac{U_i T}{L_1} D \quad (4)$$

临界连续模式介于电流连续模式和电流断续模式之间, 输出电压和输出电流同时满足式(1)和(3), 因此临界连续输出电流  $I_g$  为

$$I_g = \frac{U_1 T \eta N_1 N_2}{2L_1 N_2} D(1-D) = \frac{U_i^2 T_{ON}^2 \eta}{2L_1 U_o T} \quad (5)$$

式中  $T_{ON}$ —开关 S 导通时间。

当占空比  $D = 0.5$  时临界连续电流达到最大值  $I_{gmax}$

\* 收稿日期 2002-04-12

作者简介: 张兰红(1968-), 女, 江苏盐城人, 盐城工学院讲师, 南京航空航天大学在职博士研究生, 研究方向为功率变换技术、微机应用等。

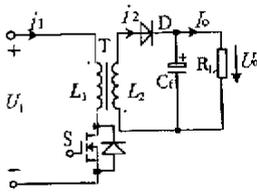
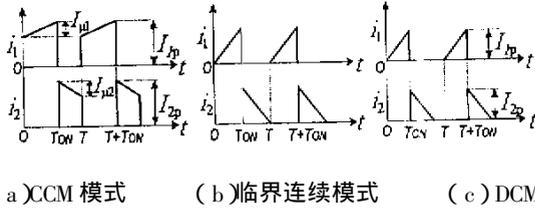


图 1 反激变换器电路拓扑

Fig.1 Circuit topology of flyback converter



a) CCM 模式 (b) 临界连续模式 (c) DCM 模式

图 2 电感 L1 和 L2 的电流波形

Fig.2 Wave forms of inductance L1 and L2

$$I_{gmax} = \frac{U_i T \eta N_1}{8 L_1 N_2} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)得

$$I_g = 4 I_{gmax} D(1 - D) \quad (7)$$

由式(3)(6)得 DCM 模式时

$$I_o = 4 I_{gmax} \frac{N_2}{N_1} D^2 \frac{U_i}{U_o} \quad (8)$$

根据式(1)(7)(8)可绘出反激变换器外特性曲线,如图3所示。曲线A为临界连续模式外特性;A左边的曲线为DCM模式外特性,此时变换器存在很高的非线性内阻,具有类似于电流源的特性;A右边的曲线为CCM模式外特性,此时输出电压与输出电流的大小无关,具有类似于电压源的特性。

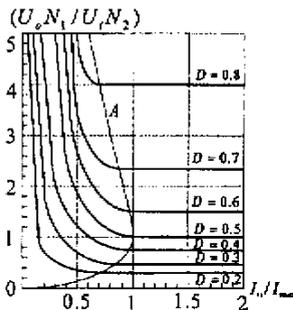


图 3 反激变换器外特性

Fig.3 The output characteristic of flyback converter

反激变换器不同模式工作情况比较如下:

① 储能变压器:CCM 模式,输出电流很小时也有一个临界连续状态,设临界连续电流  $I_g = I_{Omin}$ ,由式(5)得电感量  $L_1$  最小应为

$$L_1 = \frac{U_i^2 T_{ON}^2 f \eta}{2 I_{Omin} U_o} = \frac{U_i^2 T_{ON}^2 f \eta}{2 P_{Omin}} \quad (9)$$

式中  $P_{Omin}$ —临界连续时输出功率;

$f$ —开关频率。

DCM 模式,输出功率最大时处于临界连续状态,  $I_g = I_{Omax}$ ,电感量  $L_1$  最大应为

$$L_1 = \frac{U_i^2 T_{ON}^2 f \eta}{2 I_{Omax} U_o} = \frac{U_i^2 T_{ON}^2 f \eta}{2 P_{Omax}} \quad (10)$$

因此,相同输出功率时,DCM 模式比 CCM 模式电感量小得多,储能变压器体积也要小得多。

② 储能式变压器损耗:比较式(2)和(4)可知,DCM 模式下,电流峰值大,电流有效值相对要大一些,因此线圈的铜耗要大一些。DCM 模式下,铁耗也要大一些,因为此时铁心工作于第 II 类工作状态,电流峰值大,  $\Delta B$  较大;CCM 模式铁心工作于第 III 类工作状态,  $\Delta B$  较小。

③ 副边整流二极管的工作环境:DCM 模式变压器副边整流二极管在原边功率管再次开通前电流已下降到零,没有由于二极管反向恢复引起的振铃现象和由此引起的无线电干扰问题;CCM 模式时,则存在整流二极管的反向恢复问题。

④ 应用:由反激变换器外特性曲线可知,变换器工作于 DCM 模式,由负载变化引起的占空比调节范围很大,使调节困难,因此 DCM 模式一般用于负载变化很小且输出功率小的场合;如果负载变化很大,选择完全工作在 CCM 模式,按式(9)计算的电感量很大,此时为了减小电感体积,让变换器在小电流时工作于电流断续模式,较大电流时工作于电流连续模式。

## 2 反激变换器电路参数的设计

### 2.1 储能式变压器的设计

#### 2.1.1 铁芯型号的确定

由电磁感应定律,铁芯几何截面积  $S$  ( $cm^2$ ) 为

$$S = \frac{U_i T_{ON}}{\Delta B N_1 K_C} \times 10^8 \quad (11)$$

式中  $\Delta B$ —铁芯磁感应强度变化量;

$K_C$ —铁填充系数,

设原边绕组  $N_1$  占铁芯窗口面积的一半,则铁芯窗口面积  $Q$  ( $cm^2$ ) 为

$$Q = \frac{2 I_1 N_1}{K_{\mu j}} \quad (12)$$

式中  $K_{\mu}$ —窗口利用系数;

$j$ —导线电流密度。

因此  $SQ = \frac{2 P_O T_{ON}}{\Delta B \eta K_C K_{\mu j}} \quad (13)$

设计时,根据指标要求的  $P_0$ 、 $T_{ON}$ 、 $\eta$  及预取的  $K_C$ 、 $K_\mu$ 、 $j$ 、 $\Delta B$  值,可得  $SQ$  值,再通过查阅产品手册即可选取合适的铁芯型号。但应注意,不同工作模式  $\Delta B$  的取法不同。CCM 模式,若取电流临界连续时输出功率  $P_{Omin} = kP_0$ ,设铁芯工作磁感应强度为  $B$ ,则  $\Delta B = 2kB^{[2]}$ ,此时铁芯工作于第Ⅲ类工作状态,最大磁感应强度  $B_m = B + \Delta B/2 = B(1+k)$ ,因此  $\Delta B = 2kB_m/(1+k)$ ;DCM 模式,变压器铁心工作于第Ⅱ类工作状态,  $\Delta B = B_m - B_r$ ,  $B_r$  为剩余磁感应强度。由于铁芯单向磁化,两种模式下  $B_m$  均可取(0.6~0.8)饱和磁感应强度  $B_{So}$ 。

### 2.1.2 绕组计算

由于变压器同时作储能电感用,设计时,要注意:①电感电流中存在较大的直流分量,因而铁芯中也存在较大的直流偏磁量,为避免铁芯饱和,必须采取措施,一般采用在铁芯上加气隙的方法。②设计绕组时,须满足所要求的电感量。

根据式(9)和(11),CCM 模式中,

$$L_1 = \frac{U_i^2 T_{ON}^2 f}{2P_{Omin}} \eta = \frac{(N_1 S_C \Delta B \times 10^{-8})}{2P_{Omin}} \eta = \mu_0 \frac{N_1^2 S_C}{\delta} \times 10^{-8} \quad (14)$$

式中  $S_C$ —铁芯有效截面积 ( $\text{cm}^2$ );

$\delta$ —铁芯所开气隙长度 ( $\text{cm}$ );

$\mu_0$ —磁导率,其值为  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

由于  $\Delta B = 2kB$ ,所以

$$\delta = \frac{\mu_0 P_0 T}{2k\eta S_C B^2 \times 10^{-8}} \quad (15)$$

同理 DCM 模式中

$$\delta = \frac{2P_0 T \mu_0}{\eta S_C \Delta B^2 \times 10^{-8}} \quad (16)$$

原边绕组匝数为

$$N_1 = \sqrt{\frac{L_1 \delta}{\mu_0 S_C} \times 10^8} \quad (17)$$

根据式(1)原副边绕组匝比为

$$n_{12} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{D}{1-D} \frac{U_i}{U_o} \quad (18)$$

由式(17)(18)可得副边绕组匝数。

CCM 模式,原副边磁化电流分别为

$$I_{\mu 1} = \frac{U_i}{L_1} T_{ON} \quad (19)$$

$$I_{\mu 2} = \frac{U_o(1-D)T}{L_2} \quad (20)$$

原边绕组峰值电流由式(2)确定,副边绕组峰值电流及原副边电流有效值分别为

$$I_{2p} = \frac{I_0}{1-D} + \frac{1}{2} I_{\mu 2} \quad (21)$$

$$I_1 = \sqrt{D(I_{1p}^2 - I_{1p}I_{\mu 1} + \frac{1}{3}I_{\mu 1}^2)} \quad (22)$$

$$I_2 = \sqrt{(1-D)(I_{2p}^2 - I_{2p}I_{\mu 2} + \frac{1}{3}I_{\mu 2}^2)} \quad (23)$$

DCM 模式时,原边绕组峰值电流由式(4)决定,副边绕组峰值电流及原副边电流有效值分别为

$$I_{2p} = n_{12} I_{1p} \quad (24)$$

$$I_1 = \sqrt{D \frac{I_{1p}^2}{3}} \quad (25)$$

$$I_2 = \sqrt{(1-D) \frac{I_{2p}^2}{3}} \quad (26)$$

根据  $S = I/j$  可得原副边导线截面积,再选择合适的导线线径。至此,应再根据导线匝数和线径对铁芯窗口系数进行校核,以保证线圈能绕得下。

### 2.2 其它电路元器件的选择

功率开关管 S 上承受的电压应力为

$$U_{DS} = U_1 + \frac{N_1}{N_2} U_o \quad (27)$$

电流应力等于原边绕组峰值电流。

整流二极管 D 承受的电压应力为

$$U_D = \frac{N_2}{N_1} U_i + U_o \quad (28)$$

电流应力等于副边绕组峰值电流。

输出滤波电容为

$$C \geq \frac{5T}{8KR_L} \quad (29)$$

式中  $K$ —输出电压纹波与输出电压之比;

$R_L$ —负载电阻。

### 3 原理样机的设计与试验

对基于电流控制型 RCD 箝位 CCM 模式、DCM 模式反激变换器稳压电源原理样机分别进行了设计。两种稳压电源的技术指标分别为:输入电压:18~32 VDC,输出电压 3 组: +15 V(1.0 A)、-15 V(0.2 A)、+5 V(0.4 A),输出电压纹波:  $V_{pp} = 150 \text{ mV}$ ,工作频率:  $f = 300 \text{ kHz}$ ,最大占空比:  $D_{max} = 0.6$ ,效率: CCM 模式反激变换器  $\eta = 75\%$ ,DCM 模式  $\eta = 70\%$ 。

设计时,CCM 模式取临界连续输出功率

$P_{Omin} = 1/6 P_0$ ,选取 GU22 罐形铁芯,气隙  $\delta$  取 0.12 mm,原副边绕组匝数分别为 9、2、5、5,选用

直径 0.23 mm 的导线多股绕制而成,功率管和副边整流二极管分别选用 IRF530(100 V/14 A)和 SR506(60 V/5 A),滤波电容取 100 μF/35 V 钽电容。DCM 模式,选用 GU18 罐形铁芯,气隙 δ 取 0.19 mm,原副边绕组匝数分别为 5、1、3、3;导线线径、功率管及滤波电容的选取与 CCM 模式相同。

相同输出功率时变压器原副边电流波形,CCM 模式如图 4(a)(b)所示,DCM 模式如图 4(c)(d)所示。可见 DCM 模式原副边峰值电流均高于

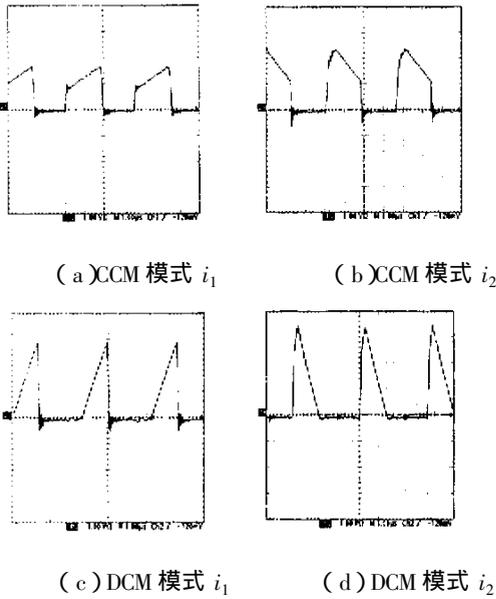


图 4 两种工作模式下变压器原副边电流波形  
Fig.4 Primary and secondary current wave forms of transformer with two operation modes

CCM 模式。输入电压为 27 V 时,两种模式下的效率曲线如图 5 所示,CCM 模式效率要高于 DCM 模式。这和前面比较工作情况时得出的结论一致。

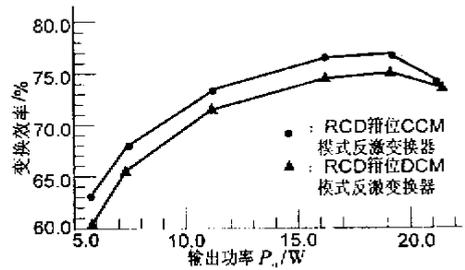


图 5 不同模式时反激变换器效率曲线  
Fig.5 The efficiency curve of the flyback converter with different operation modes

#### 4 结语

工作于 DCM 和 CCM 模式的反激变换器分别具有类似于电流源和电压源的外特性,两种模式各有优缺点,与 DCM 模式相比,CCM 模式储能变压器体积较大,且存在原边功率管开通时副边整流二极管的反向恢复问题,但它具有较高的变换效率。一般根据负载情况选取合适的工作模式:小功率且负载变化很小的场合选用 DCM 模式,负载变化较大的场合选用 CCM 模式。

设计反激变换器时,由于变压器兼作储能电感用,因此必须同时符合变压器和电感设计要求,设计时还应注意由于 DCM 和 CCM 模式铁心的工作状态不一样及两种模式下绕组中电流不一样所带来的设计过程的区别。

#### 参考文献:

[1] 张兰红.基于电流控制技术反激 DC/DC 变换器研究[D].南京:南京航空航天大学,2001.  
[2] 丁道宏.电力电子技术[M].北京:航空工业出版社,1995.

## Steady analysis and design of the flyback converter with different operation modes

ZHANG Lan-hong<sup>1</sup>, CHEN Dao-lian<sup>2</sup>

(1. Department of Electric Engineering of Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224003, China 2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Jiangsu Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In this paper, steady principles of flyback converter with inductance continuous current mode, critical continuous mode and discontinuous mode are analyzed, the conclusion that flyback converter with DCM and CCM respectively has a similar output characteristic of current supply and voltage source is drawn. Performance of flyback converter with DCM and CCM is compared, methods of selecting operation modes according to the load are pointed out. Design methods of the energy storage transformer are particularly presented. Prototypes of flyback converter are designed and experiments are made. Experimental results show agreement with the analysis.

**Keywords:** flyback converter; operation mode; output characteristic; steady analysis

万方数据