

1kW /40kHz 正-反激组合式变换器的研制

Development of 1kW 40kHz Fly-forward Converter

南京航空航天大学 陈卫昀 严仰光 (南京 210016)

摘要: 介绍了一种新型单管电路拓扑结构——正-反激组合式变换器;详细分析了工作在电流断续状态下的工作原理及参数设计原则;制作了 1kW /40kHz 的原理样机;给出了实验波形;验证了理论分析的正确性;分析了 IGBT 作为主功率器件时,提高开关频率的方法;实现了电源轻量化和小型化。

Abstract A novel topology——fly-forward converter with only one power device is presented. The operation principle and the parameter design rules of this converter at discontinuous working mode are analyzed in detail. Simultaneously, the prototype of 1kW 40kHz is made and the experimental waveforms are given. The correctness of theoretical analysis is verified. The methods for increasing switching frequency when IGBT is used as main device are also introduced, so that the weight and volume are reduced.

叙词: 变换器 脉宽调制/电流断续模式

Keywords: converters; PWM; discontinuous-current mode

1 前言

单端式变换器一直以其简单、性能价格比优越而受到人们的青睐^[1]。相对于桥式电路而言,单端式变换器所用的元器件少、结构简单、易于控制;相对于 Buck、Boost 之类拓扑,单端式变换器具有输入输出电隔离,且其输出电压与输入电压之间可以是任意比例。本文介绍的正-反激组合式变换器正是基于单端式变换器之上的一种新型拓扑。该组合式变换器仅使用一个功率器件,与传统的单端正激变换器相比,具有元件应力小、磁性元件小、体积重量小、输出纹波小等优点^[2]。我们利用单管电路拓扑制作了 1kW /40kHz 的电源。

2 工作原理分析

图 1 示出正-反激组合式变换器的原理图,它的基本工作原理是:当主功率管 V I 开通时,二极管 VD₁ 反偏截止,二极管 VD₂ 正偏导通,反激式变压器 T₁ 的原边激磁电感 L_{p1} 储存能量,同时正激变压器 T₂ 直接把能量传递给负载;当 V I 关断时,VD₂ 截止,VD₁ 导通, T₁ 副边的激磁电感 L_{s1} 向负载释放储存能量,直到下一周期 V I 再次开通。可见,在开通和关断期间,都有能量向负载输出,因而,提高了利用率。图 1 的吸收电感 L_s、吸收电容 C_s、二极管 VD₃ 和 VD₄ 组成了无损缓冲网络,它的主要功能是实现 T₂ 的

磁复位,吸收 T₁、T₂ 的漏感能量,实现 V I 的零电压关断。L_{p2}、L_{s2} 分别表示 T₂ 的原、副边激磁电感。带 LCD 复位的正-反激组合式变换器的工作过程见文献[3]。该电路比较明显的一个优点是一旦电路输出恒定, T₂ 原边的电压就钳位在 nU_o (n 为输出电压), 输入电压 U_i 的波动完全由 T₁ 承担。这样, U_i 高时, 占空比 D 减小, 加在 T₂ 原边的伏秒积减小, 使得缓冲网络吸收的能量减少, C_s 上的电压减小, 而加在 V I 上的电压等于 U_i 与吸收电容电压 U_{cs} 之和, 这使得 V I 管的 C-E 极间应力比正激式的小^[1]。

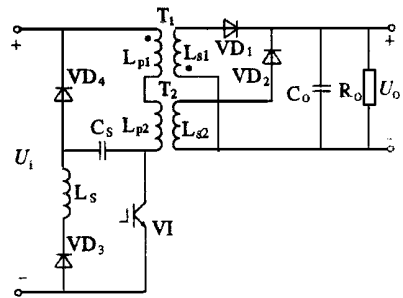


图 1 正-反激组合式变换器的原理图

下面分析正-反激组合式变换器在电流断续模式(DCM)下主电路的工作过程。分析中假设输出电容 C_o 足够大, U_o 保持恒定。

(1) V I 开通时

此时, VD₁ 关断, VD₂ 正偏导通, 等值电路

见图 2a。

$$L_{p1} \frac{di_1}{dt} = U_i - nU_o \quad (1)$$

式中 i_1 —— 流过 T_1 原边的电流, $i_1 = \frac{U_i - nU_o}{L_{p1}} t$

n —— 变压器原、副边绕组的匝比, $n = n_1 = n_2$

n_1, n_2 —— 分别为 T_1, T_2 原、副边绕组的匝比

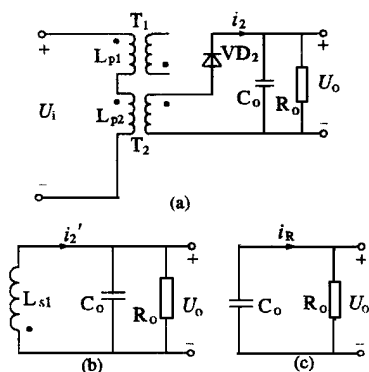
流过 T_2 副边的电流

$$i_2 = n i_1 \quad (2)$$

$$I_{1 \max} = \frac{U_i - nU_o}{L_{p1}} D T_s \quad (3)$$

$$I_{2 \max} = n I_{1 \max} \quad (4)$$

式中 T_s —— 开关周期



(a) V I 开通时 (b) V I 关断时

(c) V I VD₁, VD₂ 都关断时

图 2 各工作状态的等值电路

(2) V I 关断时

此时, VD₂ 关断, VD₁ 正偏导通, 等值电路

见图 2b。

$$L_{s1} \frac{di_2}{dt} = - U_o \quad (5)$$

式中 i_2 —— 流过 T_1 副边的电流, $i_2 = I_{2 \max} - \frac{U_o}{L_{s1}} t$

$D T_s$

$D T_s$ —— 关断时间(磁能释放时间), 即 VD₁ 的工

作时间, $D = \left(\frac{U_i}{nU_o} - 1 \right) D$

(3) V I VD₁, VD₂ 都关断时

此时的等值电路见图 2c。图中 C_o 向负载放电, 维持负载电流的连续。由于 C_o 足够大, U_o 保持恒定。

由上述分析可见, 该正-反激组合式变换器在开通和关断期间都有能量向负载传送, 两个

变压器分担负载功率 P_L, 这有助于减小磁性元件的尺寸, 使电源的小型化和轻量化成为可能。图 3 为正-反激组合式变换器的输出电流波形。

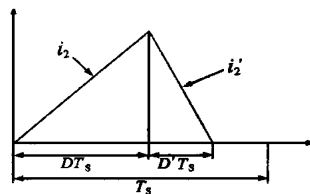


图 3 输出电流波形

3 电路参数设计

设 P_{T1}, P_{T2} 分别为 T₁, T₂ 的传递功率; T₁, T₂ 为均分 P_L, 即 P_{T1} = P_{T2} = 0.5 P_L, 因此 T₁, T₂ 的磁心尺寸和重量都小于正激式变换器中的磁性元件(传递全部功率)^[1]。电路参数的设计步骤为:

(1) 确定 n

该组合式变换器工作在 DCM 下的控制特性为:

$$D = 0.5 \sqrt{k \frac{nU_o}{U_i - nU_o}} \quad (6)$$

式中 $k = I_o / I_{G \max}$

$I_{G \max}$ —— 最大临界连续电流

为保证磁心充分复位, 应设计最大占空比 D_{max} = 0.5。根据输入和输出的电压参数, 利用式(6)可确定 n 。

(2) 确定 T₁ 的 L_{p1} 和磁心尺寸

根据所选功率器件的最大电流定额, 决定 I_{1 max}。由式(3)确定 T₁ 的 L_{p1}。由 L_{p1} 和 P_{T1}, 按照反激式变压器的设计原则确定磁心尺寸和绕组匝数。

(3) T₂ 的设计

T₂ 的设计按传统的变压器设计方法进行。

(4) C_o 的设计

C_o 的设计采用下式:

$$C_o = \frac{U_o D T_s}{8 L_{s1} \Delta U_c} \quad (7)$$

式中 ΔU_c —— 输出电压的纹波

(5) 整流管的选择

按电压电流的要求选择输出整流管。在定额一定的条件下, 尽量选用通态压降低的器件。

4 实验验证

制作了 1kW /40kHz 的电路。电路参数要求: 输出 28V /30A (DC); 输入 (220 ± 0.2)V (AC 经整流滤波); 主功率管采用 IGBT (CT60AM), 额定为 60A /1000V。

其它主要元件的型号及参数选为:

VD₁, VD₂: MUR3020PT

VD₃, VD₄: U1560

C_o = 4700μF L_s = 30μH

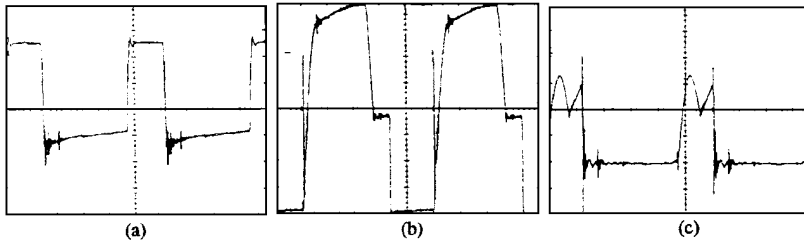
C_s = 62nF

T₁, T₂: EE55B 铁氧体磁心, 原、副边匝数
均为16匝和5匝, T₁的气隙为2mm

控制电路采用电压电流双闭环, 电流反馈

信号取自两个输出整流管。图4示出工作在 DCM 下的实验电路波形。实验条件: $u_i = 240V$, $U_o = 28V$, $I_o = 14A$, $D = 0.3$ 。图4a是V_I的 U_{ge} 驱动波形; 图4b是V_I的 U_{ce} 波形, 电压的上升时间约为 $2\mu s$, 最大值达 420V; 图4c是流经V_I的 I_{ce} 波形, 前面的馒头波是 L_s、C_s 振荡放电附加到V_I中的电流, 其峰值达 12A, 主电路的工作电流最高达 13A, 电流拖尾时间为 $4\mu s$ 。

值得指出的是, 变换器中采用单管 IGBT 作为主功率器件, 开关频率高达 40kHz, 这主要归功于 LCD 无损缓冲网络实现了功率器件的软关断, 减小了开关损耗, 改善了工作环境, 从而使开关频率得以提高。



(a) V_I 的 U_{ge} 驱动波形

(b) V_I 的 U_{ce} 波形

(c) 流过 V_I 的 I_{ce} 波形

图4 实验波形

5 结束语

文章介绍了一种新型的单电路拓扑结构——正-反激组合式变换器, 详细分析了它的工作原理和参数设计步骤, 并制作了 1kW 原理样机, 给出了实验波形。同时由于采用了 LCD 无损缓冲电路和电流断续工作模式, 改善了主功率器件 IGBT 的工作环境, 使开关频率提高到了 40kHz, 减小了变换器的体积和重量。

参 考 文 献

- 1 龚春英, 沈冬珍. 一种新颖的单端 DC/DC 开关式变

换器 南京航空学院学报, 1992, 24(2): 157~ 162

- 2 陈卫昫, 严仰光. 正-反激组合式变换器与单端正激式和反激式变换器的比较 南京航空航天大学学报 1997, 29(4): 424~ 428
- 3 陈卫昫, 严仰光. 带 LCD 复位的正-反激组合式变换器的理论分析与实验验证 南京航空航天大学学报 1997, 29(3): 336~ 341.

收稿日期: 1997-05-26

定稿日期: 1997-12-13

作者简介

陈卫昫: 女, 1971年3月生, 博士生。主要从事高频软开关技术、功率因数校正技术及直流电源等方面的研究。

严仰光: 男, 1935年3月生, 博士生导师, 教授。研究方向为电力电子技术。