

通过对一种正反激组合 DC-DC 变换器的研究探讨有源箝位技术的作用

龙飞, 李晓帆, 高奇峰, 蔡志开

(华中科技大学, 武汉 430074, hustlfei@163.com)

摘要: 通过对一种已经提出的正反激组合 DC-DC 变换器的深入研究, 分析和讨论了有源箝位技术的作用。并给出了在该正反激组合变换器中加上有源箝位回路后的波形。

关键词: 正反激组合变换器; 有源箝位技术

Analyze Active-clamp Technology According to Studying a Forward-flyback Converter's Topology

Abstract: According to studying a kind of Forward-flyback converter's topology having been proposed, analyzing the active-clamp technology. This paper gives some conclusion about active-clamp technology's merit.

Keyword: forward-flyback converter; active-clamp

1 引言

正、反激 DC-DC 变换器主要用于中小功率场合, 其的优点是: 结构简单, 控制方便, 原副方隔离, 可以方便的实现多路输出。其中反激变换器的结构尤为简单经济, 但由于反激变换只在开关管关断期间才向副方传送能量, 所以输出电压纹波较大。正激变换器只在开关管开通期间向副方传送能量, 但由于有较大的输出滤波电感, 输出电压纹波较反激变换器要小一些。而正反激组合 DC-DC 变换器综合了二者的优点, 并且在开关管开通和关断期间都可以向副方传递能量, 提高了变换器的功率密度。

2 被提出的一种正反激组合变换器

在《一种正-反激组合变换器的研究》^[1]一文中提出了一种正反激组合 DC-DC 变换器, 其拓扑结构如图 1 所示。该电路拓扑较为简单。副方使用了 4 个二极管, 导通压降较大, 所以不适合在低压大电流的情况下使用, 更适合于输出电压较高的场合, 例如用于 48V 的通信电源。其基本工作原理为: 开关管 T1 导通时, 电流流经 D1、Lo、负载、D4 回路, 工作在正激模式下。开关管 T1 关断时, Lo 中电流经过负载、D3、D1 续流,

变压器铁心中储存的磁能通过 D2、负载、D3 回路释放, 这一回路工作在反激模式下。

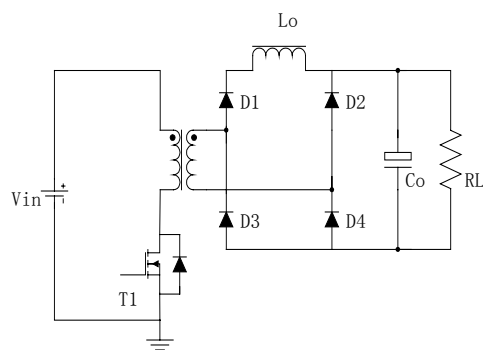


图 1 一种正反激组合变换器的拓扑结构

但图 1 所示正反激组合变换器电感 Lo 不能工作在电流连续模式 (CCM) 下, 只能工作在电流断续模式 (DCM) 下。具体分析如下:

首先假设 Lo 中电流连续, 那么在开关管开通期间, Lo 上电流增加量为:

$$\Delta I_{Lo} (\text{上升}) = D T V_{in} / N L_o \quad (1)$$

$$\Delta I_{Lo} (\text{下降}) = (1-D) T V_o / L_o \quad (2)$$

当电路工作在稳态时, 有

$$\Delta I_{Lo} (\text{上升}) = \Delta I_{Lo} (\text{下降})$$

由式 (1) 与式 (2)

$$V_o = D V_{in} / N \quad (3)$$

其中 D 为导通比, T 为开关周期。Vin 为原方输入电压, Vo 为输出电压, N 为变压器变比。

当开关管 T1 导通时加在变压器原方的

伏秒积为+DTVin。当开关管 T1 关断时，加在变压器付方上的伏秒积为-(1-D)TVo，折算到变压器原方为-N (1-D)TVo，将式 (1) 带入得到 T1 关断时等效加在变压器原方的伏秒积为-D(1-D)TVin。因为 D(1-D)TVin 恒小于 DTVin，即加在变压器上的伏秒积不对称，导致变压器铁心偏磁，磁通无法复位。

所以在上述电路中，Lo 无法工作在电流连续模式下，只能在电流断续模式下工作，这样导致输出电流纹波较大。

3 增加有源箝位回路

对于反激变换器来说，其隔离变压器实际不是工作在普通变压器状态，而是作为一个具有隔离作用的储能电感。开关管导通期间，原方电流转变为磁场能量储存在变压器铁心中。在开关管关断期间，储存在变压器铁心中的磁场能量转移到副边释放，所以反激变换器中铁心磁通是可以自动复位的。因此，反激变换器的隔离变压器一般带有气隙，气隙主要有两个作用：

一是增加变压器传送的功率，因为铁心加上气隙以后，磁化曲线如图 2 (b)：

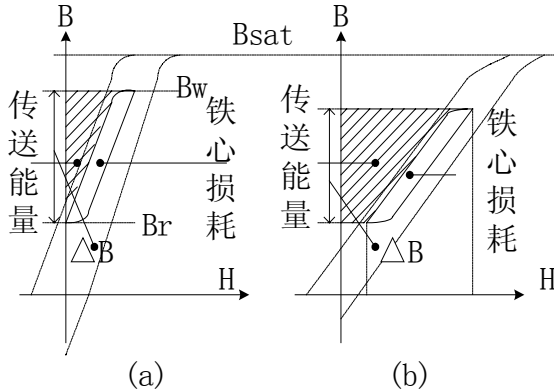


图 2 变压器磁化曲线图

(a) 未加气隙的磁化曲线图

(b) 加气隙的磁化曲线图

由图中可以看出，加上气隙以后，磁化曲线向 H 轴倾斜，变压器传输的功率的公式^[4]为：

$$P = f \cdot Ve \int_{Br}^{Bw} H dB$$

变压器加上气隙以后，传送功率增大，即阴影部分面积增大。当然带来的缺点是铁心损耗也增大，但可以通过适当减小 ΔB 减小铁心损耗。

二是防止变压器铁心饱和，当加上气隙磁化曲线向 H 轴倾斜时，图 2 (b) 中磁滞回线顶点与饱和磁通 Bsat 距离增大。

在正激变换器中，其隔离变压器工作在正常的变压器状态，开关管导通期间磁化电流在铁心中也产生一定的磁能，当开关管关断后，这些磁场能量无法转移到副边释放，所以造成铁心中磁通不能复位。为了使正激变换器铁心中磁通复位，现在一般采用有源箝位技术，为正激变换器铁心中储存的磁能提供一条释放回路，如图 3 所示：

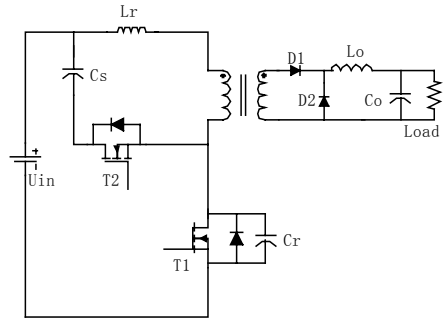


图 3 带有源箝位的单端正激变换器

有源箝位的正激变换器利用 Cs 和辅助开关管 T2 为变压器铁心磁能提供一条释放回路，复位变压器铁心磁通。并能吸收变压器漏感 Lr 上的能量，将主开关管 T1 上的电压箝位在 Vin+Vcs 附近。同时当 Lr 足够大时，可以实现主开关管的软开关^[2]。对于箝位电压 Vcs，为了保证变压器可以复位磁通，原边绕组所加的正负电压伏秒积必须相等。所以 $Vcs = DVin / (1-D)$ ^[3]。伏秒积为 $-(1-D)TVcs = -DTVin$ 。

采用有源箝位回路的第二个好处就是可以将变压器原方漏感能量吸收掉，防止漏感 Lr 对主开关管结电容 Cr 充电使开关管上出现尖峰电压。第三个好处是可以实现主开关管与辅助开关管的软开关。因此有源箝位回路也可以用于单端反激变换器和正反激组合变换器中，帮助吸收变压器漏感能量，并实现主开关管与辅助开关管的软开关。

而上述正反激组合变换器同时运行在正激和反激状态，所以 Lo 只能工作在 DCM 模式下。

如果给图 1 所示电路加上有源箝位回路的，如图 4 所示：

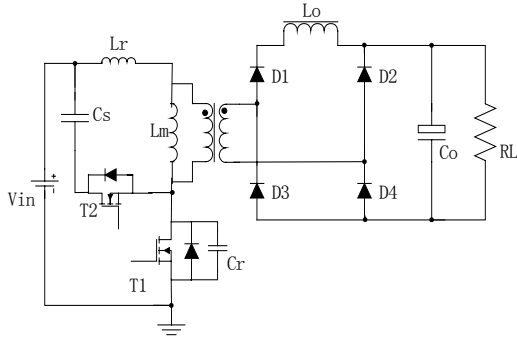


图4 带有源箝位的正反激组合变换器

其中, L_m 为变压器的等效励磁电感。

在文献[3]中提到带有源箝位的正激变换器可以双向对称磁化变压器, 使变压器工作在 B-H 回线的一、三象限, 使变压器得到充分利用, 使占空比可以大于 0.5。那么该正反激组合变换器在加上有源箝位回路以后能否在保证 L_o 工作在 CCM 模式下复位变压器磁通呢? 分析如下:

假设 L_o 工作在 CCM 下时, 由式 (3) 依然有 $V_o = DV_{in} / N$ 。当电路进入反激状态, 变压器付方被箝位在输出电压 V_o , 此时原方箝位电容上电压必然为 NV_o 。利用有源箝位回路复位变压器的条件是保证箝位电容加在变压器的伏秒积与开关管开通时伏秒积绝对值相等。

开关管开通时, 伏秒积为:

$$VS = DTV_{in} \quad (4)$$

开关管关断时, 箝位电容 C_s 复位变压器磁通所需要的电压为:

$$= VS / (1-D) = DTV_{in} / (1-D) \quad (5)$$

而现在箝位电容所能提供的电压为:

$$V_{Cs} = NV_o = DV_{in} < V_{Cs}'$$

因此即使加上有源箝位回路也不能在保证 L_o 工作在 CCM 模式下复位磁通。事实上这是由该电路的内在特性决定的。也就是说, 该电路只要有反激存在, 就不能使 L_o 工作于 CCM 模式下。

单端正激与单端反激变换器之所以可以实现磁复位是因为基本的单端正激变换器和反激变换器主电路拓扑本身可以实现磁复位, 当然正激变换器要提供必要的复位回路, 以前一般采用加上复位绕组提供复位回路。对于单端正激变换器, 如图 3, 一旦开关管关断, 由于二极管 D_1 截止, 变压器

付方将处于悬浮状态, 从而原方复位电压完全由 V_{Cs} 决定。

有源箝位回路只是作为一种辅助手段, 提供一条复位回路, 不可能对主电路工作原理有根本性的改变。所以该电路即使加上有源箝位回路, 输出滤波电感 L_o 不可以工作在 CCM 模式下, 只能是 L_m 工作在 CCM 模式下, 而 L_o 工作在 DCM 模式下, 如[1]文中提到的那样。基本波形如图 5:

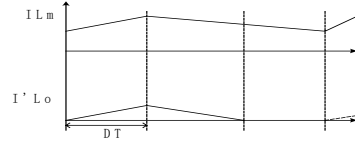


图5 不带有源箝位的正反激组合变换器的基本波形

当变压器等效励磁电感 L_m 工作在 CCM 模式下时, 开关管开通其间, L_m 电流上升为:

$$\Delta I_{Lm} (\text{上升}) = DTV_{in} / L_m \quad (6)$$

当开关管关断时, 付方 L_m 电流下降为:

$$\Delta I_{Lm}' (\text{下降}) = (1-D)TV_o / L_m' \quad (7)$$

L_m' 为折算到付方的等效励磁电感。

折算到原方为:

$$\Delta I_{Lm} (\text{下降}) = \Delta I_{Lm}' (\text{下降}) / N \quad (8)$$

将 $L_m' = L_m / N^2$ 带入式 (8), 得到:

$$\Delta I_{Lm} (\text{下降}) = N(1-D)TV_o / L_m \quad (9)$$

当电路进入稳态, 由

$$\Delta I_{Lm} (\text{上升}) = \Delta I_{Lm} (\text{下降}) \text{ 得到:}$$

$$V_o = DV_{in} / N(1-D) \quad (10)$$

4 带有源箝位的正反激组合变换器的工作波形

虽然有源箝位回路不能使 L_o 工作在 CCM 模式下, 但仍然可以吸收变压器原方漏感能量, 降低开关管电压应力, 将开关管 T_1 上电位箝位在 $NV_o + V_{in}$ 附近, 并且实现电路主辅开关管的软开关, 提高效率。

参考文献[2], 本文给出了加上有源箝位回路以后该变换器的基本工作波形如图 6:

图 6 中 I_{Lm} 与 I_{Lo} 的波形与图 5 中波形基本相同, 证明有源箝位回路不能改变原主电路的工作原理。

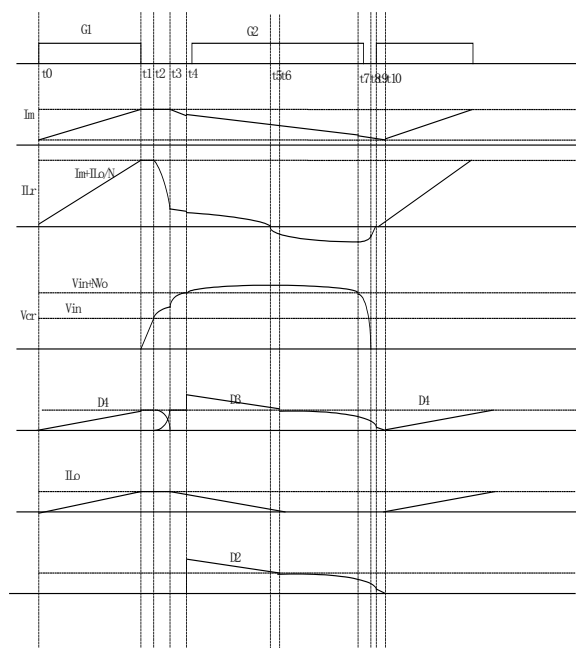


图 6 带有源箝位的正反激组合变换器的工波形

5 结论

有源箝位技术可以适用于任何单管带变压器隔离的 DC—DC 电路中，有源箝位回路可以为主电路提供磁复位回路，但不能改变主电路的基本工作原理。有源箝位技术可以吸收变压器原方漏感，降低主开关管电压应力。同时有源箝位技术可以实现变换器的软开关。

参考文献：

- [1] 王国礼等. 一种正-反激组合变换器的研究[J]. 电力电子技术, 2001, (2): 4~6.
- [2] 张卫平等. 绿色电源—现代电能变换技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] 阮新波, 严仰光. 直流开关电源的软开关技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.

作者简介：

龙飞 男，硕士研究生，主要从事电力电子和电气传动技术的研究和开发。