

单端反激电路在逆变电源中的应用

摘要：介绍了一种采用多管并联和能量回馈技术的单端反激电路，该电路在低压供电的逆变电源中使用，具有电路简单、效率高、稳定可靠等特点。

0 引言

目前，由电池供电的逆变电源一般由两级组成，前级 DC/DC 电路将电池电压变换成直流约 350V 电压，后级 DC/AC 电路将直流 350V 电压变换为交流 220V 电压。在这类逆变电源中，前级 DC/DC 电路一般供电电压较低（12V、24V 或 48V），输入电流较大，功率管导通压降高，损耗大，所以电源效率很难提高。其电路形式有：单端反激、单端正激、双管正激、半桥和全桥等，对于中小功率（约 0.5~1kW）而言，单端反激电路具有一定优势，如：电路简单、控制方便、效率高。本文以 24V 电池供电，输出 350V/1kW 为例，对单端反激电路，在逆变电源前级 DC/DC 电路中的应用做一些探讨。

1 常规单端反激电路结构

常规单端反激电路结构如图 1 所示，该电路的缺点在于功率管 VT 截止时，变压器初级的反峰能量，被 VD1、C 1 和 R 1 组成的吸收电路消耗掉；而且在输出功率相同的情况下，功率管通过电流（相对于多管并联）大，导通压降高，损耗大，所以效率和可靠性较低。

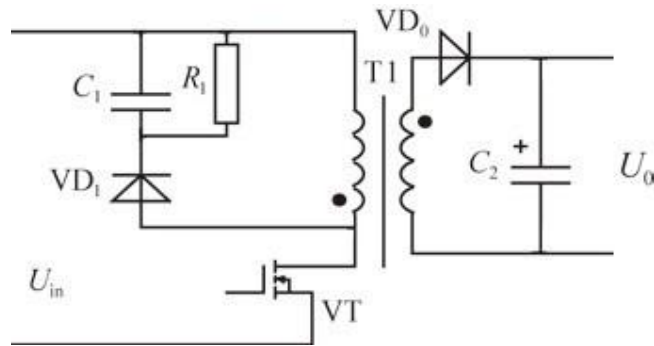


图 1 常规单端反激电路结构

2 多管并联的单端反激电路结构

如图 2 所示,该电路的特点是,主功率电路采用 4 只功率管并联,每只功率管通过的电流为单管应用时的 1/4 (假定 4 只功率管参数一致),则功率管的导通压降也应为单管应用时的 1/4. 根据计算,在输出 550W 时,理论上,4 管并联比单管可减小通态损耗约 20W,提高效率近 3 个百分点。

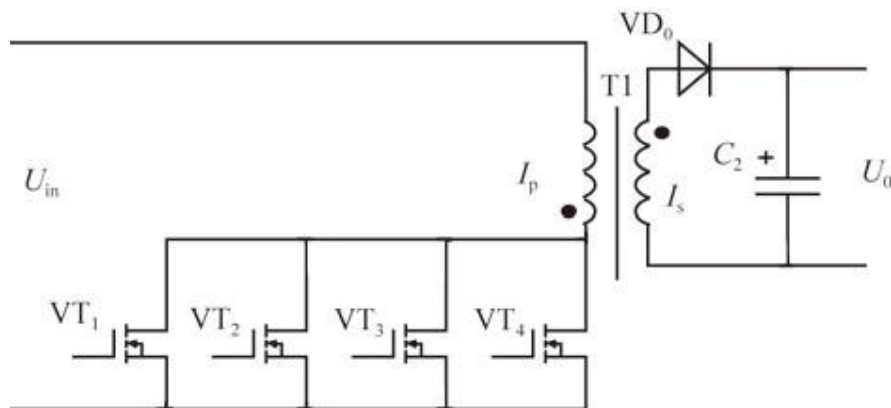


图 2 4 只功率管并联主功率电路

3 采用能量回馈技术的单端反激电路结构

采用能量回馈技术的单端反激电路结构如图 3 所示,其主要波形如图 4 所示。在本电路中,用电容 C 2、电感 L 1、二极管 VD1 和 VD2

组成变压器初级反峰吸收电路，可使大部分反峰能量回馈到输入电容 C₁ 上，减少了能量损耗，提高了电路效率。

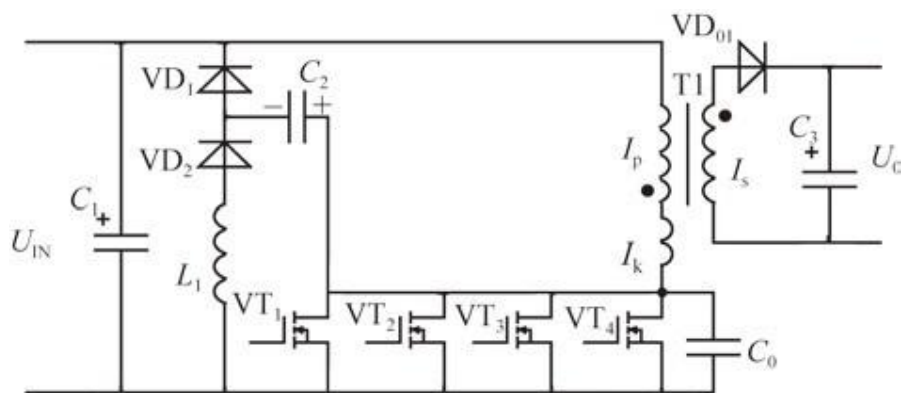


图 3 初级反峰吸收电路

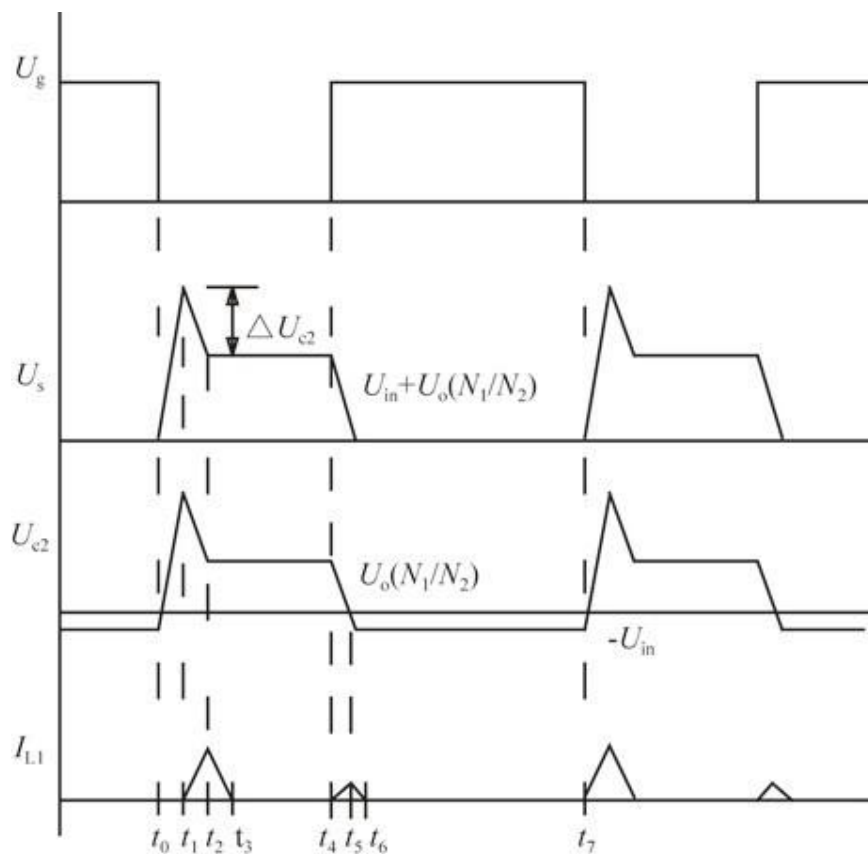


图 4 初级反峰吸收电路主要波形

其工作原理如下：

(1) t₀~t₁ 阶段。

t_0 时刻功率管截止，变压器初级电感 L 、漏感 L_K 、电容 C_2 和功率管输出电容 C_0 开始谐振，并很快使 C_2 电压达到 $U_0 (N_1/N_2)$ ，随后次级二极管导通，初级电压被钳位到 $U_0 (N_1/N_2)$ ，初级电感 L 退出谐振，到 t_1 时刻 I_K 为 0，同时 C_2 和 C_0 上电压达到最大值，即开关管电压 U_S 达到最大值 $(U_{IN} + U_{C2MAX})$ 。

(2) $t_1 \sim t_2$ 阶段。

在 L_K 、 C_2 、 C_0 继续谐振，同时电感 L_1 参与谐振， C_2 、 C_0 给输入电容 C_1 回馈能量，并且给 L_1 补充能量，到 t_2 时刻谐振停止， C_2 电压又下降到 $U_0 (N_1/N_2)$ 。

(3) $t_2 \sim t_3$ 阶段。

t_2 时刻开始，电感 L_1 给输入电容 C_1 回馈能量。

C_2 电压被钳位在 $(N_1/N_2) U_0$ 、 C_0 即开关管上电压为 $U_{IN} + (N_1/N_2) U_0$ ，均保持不变，到 t_3 时刻， L_1 中能量释放完毕。

(4) $t_3 \sim t_4$ 阶段。

开关管完全截止， C_2 电压、 C_0 电压（即开关管电压）继续保持不变。

(5) $t_4 \sim t_5$ 阶段。

t_4 时刻功率管导通，其电压 U_S 开始下降， C_0 开始通过开关管放电，并很快放完毕（全部损耗在功率管上）； C_2 和 L_1 开始谐振，即把 C_2 中的能量转移到 L_1 中，在 t_5 时刻 L_1 中电流达到最大值，功率管完全导通。

(6) $t_5 \sim t_6$ 阶段。

t 5 时刻 L 1 通过 VD1 和 VD2 给输入电容 C 1 回馈能量，并给 C 2 充电到 -U IN, 到 t 6 时刻 L 1 中能量释放完毕。

(7) t 6~t 7 阶段。

该阶段功率管继续处于完全导通状态。

以上过程形成一个完整工作周期，可以看出，变压器漏感中的能量大部分被回馈到输入电容 C 1 中（C 0 中有部分能量被消耗掉），所以电源效率得到提高。

4 主要器件电压电流应力计算

由图 3 及原理分析，可得到如下计算公式：

$$U_{S\text{MAX}} = U_{\text{INMIN}} + U_0 N_1 / N_2 + \Delta U_{C2} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} I_{\text{PK}}^2 L_{\text{K}} &= \frac{1}{2} C_2 U_{C2\text{MAX}}^2 + \frac{1}{2} C_0 U_{C0\text{MAX}}^2 - \frac{1}{2} C_2 (U_0 N_1 / N_2)^2 \\ &\quad - \frac{1}{2} C_0 (U_{\text{IN}} + U_0 N_1 / N_2)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$I_{\text{PAV}} = P_0 / \eta D_{\text{MAX}} U_{\text{INMIN}} \quad (3)$$

$$\Delta I_{\text{P}} = U_{\text{INMIN}} t_{\text{ONMAX}} / L \quad (4)$$

$$I_{\text{PK}} = I_{\text{PAV}} + \frac{1}{2} \Delta I_{\text{P}} \quad (5)$$

$$\frac{1}{2} L_1 I_{\text{LIMXA}}^2 = \frac{1}{2} C_2 U_{C2\text{MAX}}^2 - \frac{1}{2} C_2 (U_0 N_1 / N_2)^2 \quad (6)$$

$$P_{\text{LK}} = \frac{1}{2} I_{\text{PK}}^2 L_{\text{K}} f \quad (7)$$

其中： U_{SMAX} 即 U_{COMAX} 为功率管 VT1~VT4 所承受的最大电压应力；

U_{IMIN} 为输入电压最小值（取 21V）；

U_0 为输出电压（取 350V）；

N_1 、 N_2 为变压器初次级匝数（取 15 匝和 117 匝）；

ΔU_{C2} 由漏感引起的尖峰电压；

I_{PK} 为漏感即初级峰值电流；

L_K 为初级漏感（取 $0.4 \mu H$ ）；

C_2 为外接电容（取 30000pF）；

C_0 为 VT1~VT4 输出电容之和（取 4000pF）；

I_{PAV} 为功率管导通期间总电流平均值；

η 为电源效率（取 92%）；

D_{MAX} 为最大占空比（取 0.7）；

ΔI_p 为开关管导通期电流变化量；

t_{ONMAX} 为开关管最大导通时间（取 $23 \mu s$ ）；

L 为变压器初级电感值（取 $38 \mu H$ ）；

I_{L1MAX} 为 L_1 （取 0.5mH）中通过的最大电流；

P_{LK} 为漏感回馈到输入端的能量；

f 为功率管开关频率（取 30kHz）。

由以上（1）~（6）式推导和化简，可得出下式：

$$I_{PK} = P_0 / (\eta D_{MAX} U_{INMIN}) + \frac{U_{INMIN}}{2L} t_{ONMAX} \quad (8)$$

$$\Delta U_{C2MAX} = \sqrt{U_0^2 \frac{N_1^2}{N_2^2} + \frac{I_{PK}^2 L_K}{C_2 + C_0}} - U_0 N_1 / N_2 \quad (9)$$

$$U_{SMAX} = U_{INMIN} + \sqrt{U_0^2 \frac{N_1^2}{N_2^2} + \frac{I_{PK}^2 L_K}{C_2 + C_0}} \quad (10)$$

$$I_{L1MAX} = \sqrt{\frac{C_2}{L_1} (U_{C2MAX}^2 - (U_0 N_1 / N_2)^2)} \quad (11)$$

由 (7) ~ (11) 式可计算出功率管、电感 L1 所承受的电流电压应力（输出功率 550W 时）以及反峰吸收电路回馈到输入端的能量：

$$I_{PK} = 47A$$

$$U_{SMAX} = 188V$$

$$I_{L1MAX} = 1.5A$$

$$P_{LK} = 13.25W$$

同时由 (7) ~ (11) 式还可以看出：

(1) 若要减小开关管电流应力 I_{PK} ，则应增加占空比 D 和变压器初级电感量 L；

(2) 若要减小开关管电压应力 U_{SMAX} ，则应减小变压器初级漏感 L_K，同时增加 C₂ 值（C₀ 的值由功率管参数决定）；

(3) 若要减小电感 L_1 中最大电流 I_{L1MAX} , 则应增大电感 L_1 的电感量; (4) 采用反峰吸收电路后, 节省能量 13.25W, 可提高电源效率约 2 个百分点。

由以上计算可知, 4 只功率管额定电流至少应大于 50A, 考虑到功率管参数的差异性, 其导通电流不完全相等, 并且一般要留一定的安全裕量, 所以, 实际应用每只功率管额定电流值应大于 50A, 通态电阻愈小愈好, 而耐压最好大于 250V。

根据如下公式, 可计算出二极管 VDO 所承受的电压应力 U_{DO} 、电流应力 I_{SK} :

$$\text{由 } U_{DO} = U_0 + U_{INMAX} \sqrt{2/N} \quad (12)$$

$$\text{得: } U_{DO} = 584V$$

$$\text{由 } I_{PK} \sqrt{2/N} = I_{SK} \quad (13)$$

$$\text{得: } I_{SK} = 6A$$

其中: I_{SK} 为次级峰值电流值。

一般要留一定的安全裕量, 所以, 而选用二极管额定电压应大于 800V, 额定电流应大于 20A (考虑到过流、短路等因素)。

5 两路单端反激并联电路结构

若要增加输出功率, 采用如图 5 并联结构, 该电路结构可输出功率约 1.1kW, 用一只 SG3525 控制即可。

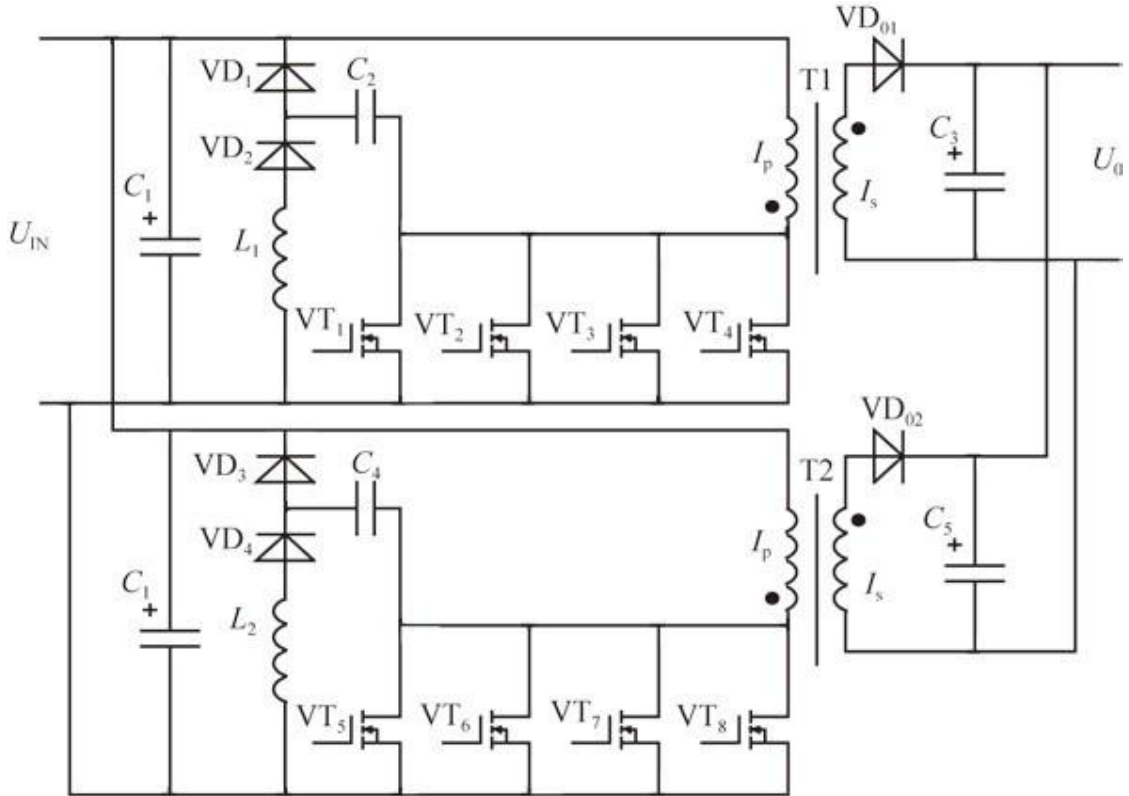


图 5 两路单端反激并联电路结构

6 试验结果

由两路单端反激并联组成的逆变电源前级 DC/DC 电路（见图 5），输出功率约 1.1kW，试验结果如表 1 所示。

表 1 前级 DC/DC 试验结果

输入电压 U_{in}	21.064V	24.030V	30.012V
输入电流 I_{in}	57.01A	49.05A	38.35A
输出电压 U_0	345.1V	345.0V	343.4V
输出功率 P_O	1087.5W	1085.3W	1075.9W
效率 η	90.6%	92.1%	93.5%

由上述 DC/DC 电路组成的 1kVA 逆变电源，输出 AC220V50Hz 正弦波，试验结果如表 2 所示，该电源体积 $320 \times 200 \times 60\text{mm}^3$ 。

表 2 1kVA 逆变电源试验结果

输入电压 U_{in}	21.170V	24.031V	29.928V
输入电流 I_{in}	54.8A	47.3A	37.8A
输出电压 U_0	220.35V	219.98V	220.45V
输出功率 P_0	1020.2W	1018.5W	1020.7W
效率 η	87.9%	89.5%	90.2%

7 结束语

综上所述，对于电池（或发电机）供电的低压输入逆变电源，采用单端反激多管并联以及能量回馈技术实现的前级 DC/DC, 和采用其它形式实现的前级 DC/DC 相比，具有电路简单、控制方便、效率高、体积小和可靠性高等特点。