

单端正激有源钳位软开关逆变电源的仿真研究

清华大学 龙轶伟 朱志明

摘要 本文通过对单端正激有源钳位逆变电路的理论分析,推导出实现功率开关管软开关的条件,并采用仿真技术对主要参数进行了仿真优化,为实际电路参数的设计提供了有力的依据。

关键词 单端正激 仿真 软开关

0 前言

将软开关逆变技术应用于弧焊逆变电源是焊接电源的研究热点和重要方向。针对电弧负载的复杂性和特殊性,实现并保持宽负载范围和动态负载下逆变电路的软开关工作状态成为选择软开关逆变电路的拓扑结构及其在弧焊逆变电源中成功应用的关键。

国外在八十年代末提出了单端正激有源钳位软开关逆变电路的拓扑结构,随后国内也对之进行了一定的研究,但基本上还停留在简单的理论分析阶段和确定的静态负载的情况下^{[1][2]}。本文在理论分析的基础上仿真研究了该电路的工作过程,获得了功率开关管实现零压导通的条件,为其在弧焊逆变电源中的应用奠定了基础。

1 电路结构

单端正激有源钳位软开关逆变电路拓扑结构简单,其电路原理及波形如图 1 所示,按主辅开关管的工作状态可将电路的工作过程分为四个区间。

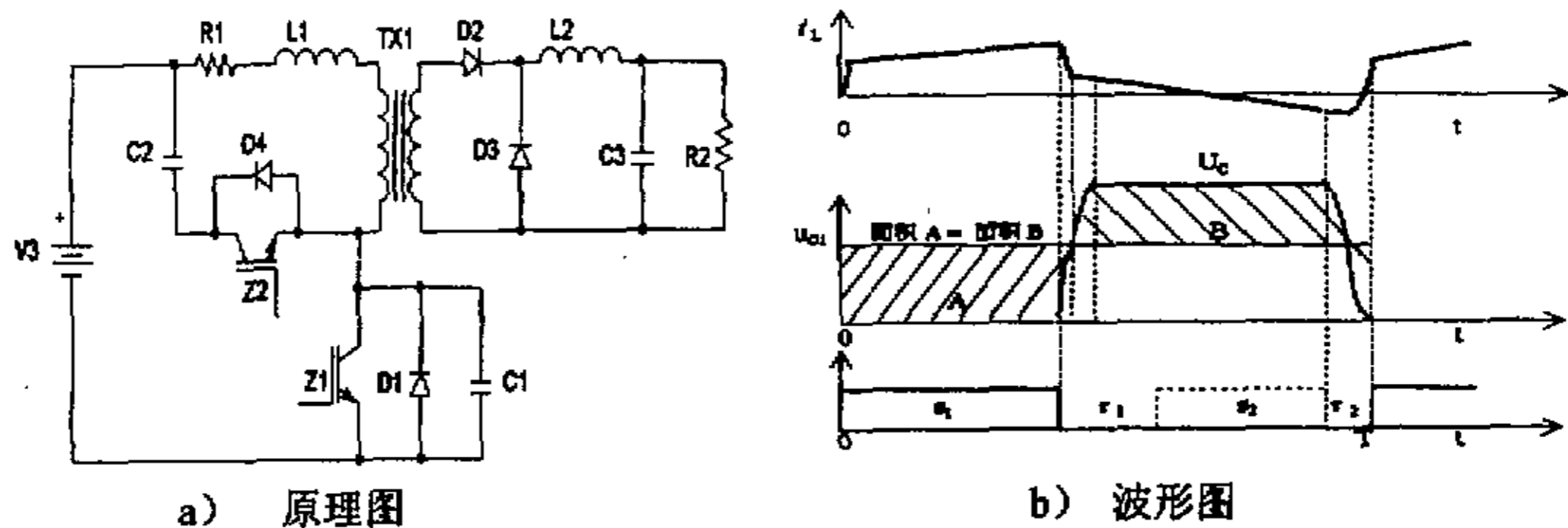


图 1 单端正激有源钳位软开关逆变电路的拓扑结构与波形图

s_1 区间: 主开关管 Z_1 导通, D_1 、 D_3 截止, D_2 导通, 变压器向负载传输能量。

τ_1 区间: Z_1 关断, 变压器 TX_1 的原边电流对谐振电容 C_1 充电, 当 C_1 上的电压增大到电源电压 U_{V3} 后 D_2 关断, D_3 导通, 变压器副边无电流流过。变压器的励磁电流使 C_1 上的电压继续上升直到钳位电压 U_C , 这时 D_4 导通, 原边电流给钳位电容 C_2 充电直到变压器原边电流下降到零为止。辅助开关管 Z_2 应在 D_4 导通期间开通, 此时 Z_2 为零压导通。根据变压器的伏秒积平衡原理可得 C_2 上电压 $U_{C2} = \frac{D}{1-D} U_{V3}$, 钳位电压 $U_C = \frac{1}{1-D} U_{V3}$ 。

s_2 区间: Z_2 导通, 当 D_4 上流过的正向电流下降到零后, 电容 C_2 通过 Z_2 放电, 变压器原边电流 i 从正变到负, 电容 C_2 实现从充电到放电的转换。

τ_2 区间: Z_2 关断, 变压器原边电流使谐振电容 C_1 放电, 其初值等于 C_2 放电电流的终值 I_0 。谐振电容 C_1 、电源 V_3 、变压器 TX_1 原边电感 L_T 以及原边串连电感 L_1 (包含变压器漏感) 形成有初值的 LC 振荡回路。如果 C_1 上的电压能谐振到零, 并在此时刻使 Z_1 导通, 则可实现主开关管 Z_1 的零压导通。

2 实现软开关的条件

辅助开关管 Z_2 关断后, 由 L_1 、 TX_1 、 C_1 和 V_3 构成的 LC 谐振电路的工作过程可用如下微分方程组表示:

$$\begin{cases} i_L = \frac{du_{C1}}{dt} \times C_1 \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{U_{V3} - u_{C1}}{L} \end{cases} \quad (1)$$

其中 u_{C1} 为电容 C_1 上的电压, L 是为变压器原边回路的总电感。

求解微分方程组可以得到

$$u_{C1} = A \sin\left(\frac{1}{\sqrt{LC_1}} t + \theta\right) + U_{V3} \quad (2)$$

LC 谐振电路的工作过程分为两个阶段: 第一阶段为谐振电容 C_1 上的电压 u_{C1} 由钳位电压 U_C 下降到电源电压 U_{V3} 之前, 在此阶段由于电容 C_1 很小, 且回路谐振电感 L 等于 L_1 和变压器原边电感 L_T 之和, 其值很大, 因此可以假设在此阶段电感 L 中的电流基本保持 I_0 不变; 第二阶段为谐振电容 C_1 上的电压 u_{C1} 下降到 U_{V3} 后, 此时 D_2 导通, 由于 D_3 反向恢复时间的存在, 变压器 TX_1 副边实际上相当于短路, 谐振回路电感只有 L_1 继续存在。考虑此时电路的初始条件 $u_{C10} = U_{V3}$, $i_{L0} = I_0$, 有

$$\begin{cases} A \sin \theta + U_{V3} = U_{V3} \\ A \times C_1 \times \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \cos \theta = I_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$|A| = I_0 \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (4)$$

从上式可以看出, 为了实现主开关管 Z_1 的零压导通, 可以采取如下措施:

- 1) 增大谐振初始电流 I_0 , 这可以通过减小变压器原边电感 (如增大气隙) 实现。
- 2) 增大第二阶段谐振回路的阻抗 $\sqrt{L_1/C_1}$, 在电容 C_1 一定的条件下, 可以通过在变压器原边或副边串联一定的电感以增大 L_1 。实际应用时应综合考虑上述两种措施的作用。

3 死区时间

在满足上述软开关条件的基础上, 要实现开关管的零压导通, 还必须选择合适的死区时间 τ_1 和 τ_2 。

死区时间 τ_2 包含两部分, 一部分为谐振电容 C_1 上的电压由峰值下降到 U_{V3} 的时间, 可由下式确定:

$$\tau_{21} = \frac{U_C - U_{V3}}{I_0} \times C_1 \quad (5)$$

另一部分为 C_1 上的电压由 U_{V3} 谐振到零的时间, 约等于谐振周期的 1/4, 即:

$$\tau_{22} = \frac{\sqrt{L_1 C_1}}{2} \quad (6)$$

死区时间 τ_1 的范围确定起来比较简单, 只要保证辅助开关 Z_2 在 Z_1 关断后 C_1 充电到钳位电压 U_C 之后并在变压器原边电流减小到零之前开通, 都可以使得 Z_2 实现零压导通。

4 仿真结果及波形分析

根据上述分析建立的主电路仿真模型如图 2 所示, 图 3 为优选主电路参数及死区时间后的仿真结果, 由图 3 可见主辅开关管均实现了零压导通。

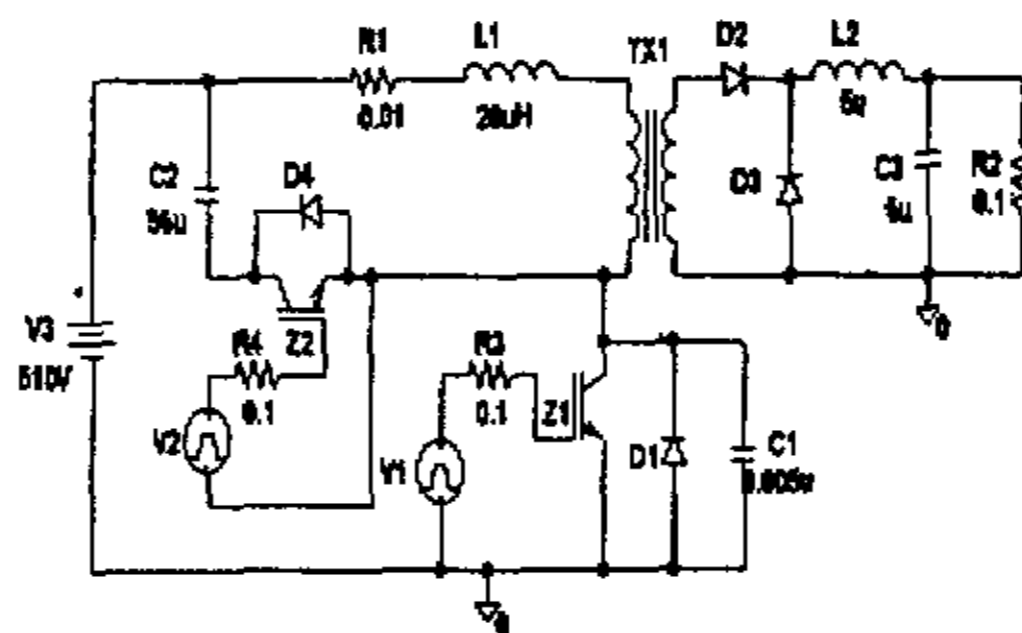


图 2 仿真电路图

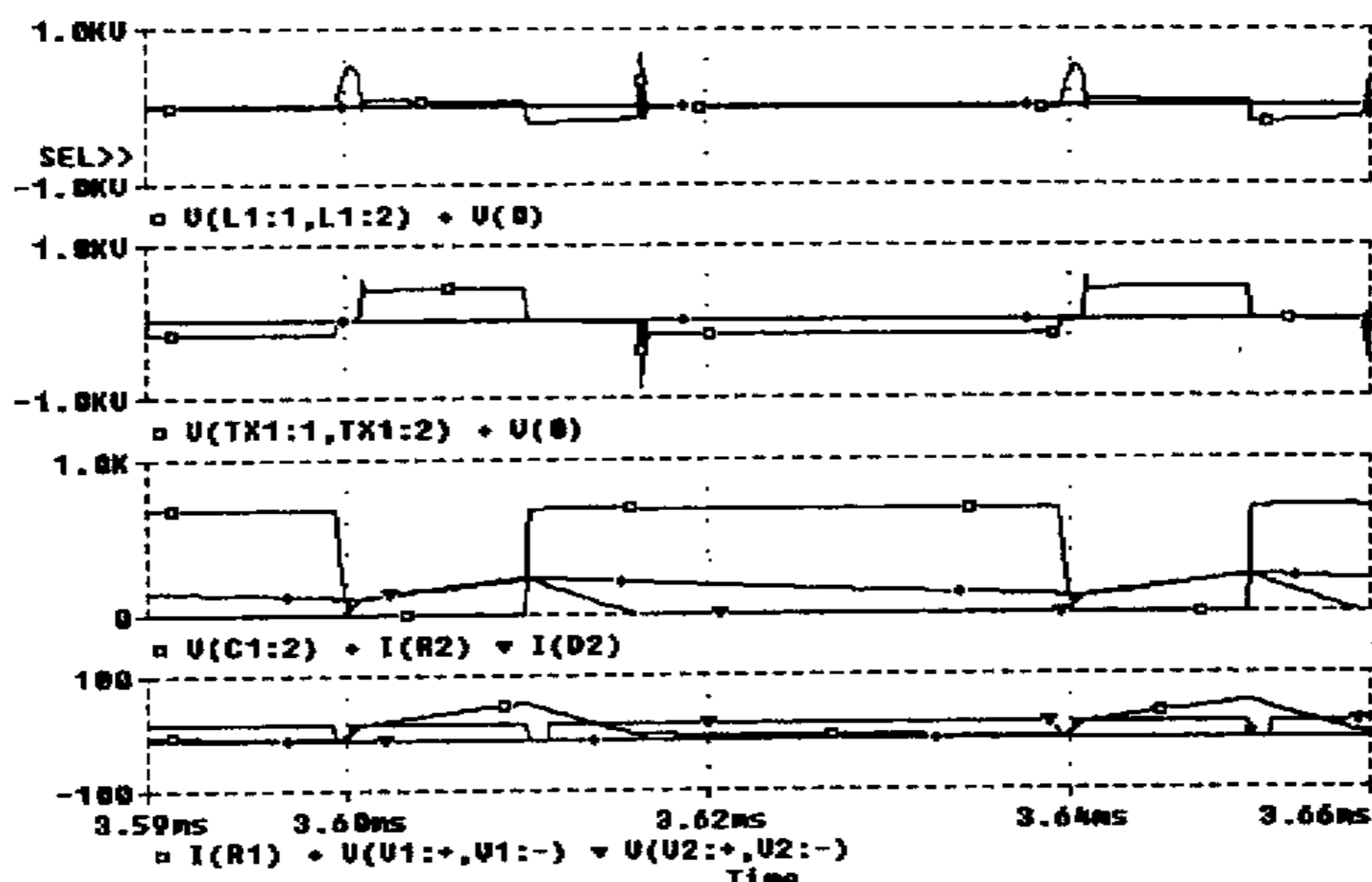


图3 仿真结果波形图

其中： $V(L1:1, L1:2)$ 为电感 L_1 上的电压；

$V(TX1:1, TX1:2)$ 为变压器 TX_1 的原边电压；

$V(C1:2)$ 为电容 C_1 上的电压；

$V(V1:+, V1:-)$ 、 $V(V2:+, V2:-)$ 分别为主辅开关管的电压驱动信号，大小为+15/-12V；

$V(0)$ 则是参考的电压零线；

$I(R2)$ 、 $I(D2)$ 、 $I(R1)$ 分别是 R_2 、 D_2 、 R_1 上的电流。

5 结论

1) 单端正激有源钳位逆变电路实现软开关的条件由谐振回路的初值电流 I_0 和谐振回路的参数共同确定，实际应用时应综合考虑初值电流 I_0 和谐振电感 L_1 的作用。

3) 在主电路参数满足软开关的条件下，控制电路必须提供合理的死区时间，以在适当的时刻控制主、辅开关管的开启。

3) 仿真研究为检验电路参数设计的合理性，进一步确定实际电路的主要参数提供了有效的辅助分析手段。

参考文献

- 1 毕强. PWM 正激式零电压软开关及电源. 电力电子技术, 1994, 28 (4).
- 2 陈道炼, 严仰光. 零电压过渡 PWM 正激变换器的原理与设计. 电力电子技术, 1998, 32 (4).