

零电压软开关的设计与分析

丁昕健

(金陵科技学院, 江苏 南京 211169)

摘要 在电器回路中软开关是重要的装置, 可以对负载进行连通及切断, 该方式主要在负载切断以及接通并非瞬间完成的情况下使用。实际上软开关常常运用在照明回路中, 软开关的引入能防止灯光突然改变对人眼产生刺激, 尤其在全黑的状况中。高频开关电源技术中, 增加功率开关频率, 能通全面降低电源的体积及重量, 为有效解决该问题就要借助软开关技术。谐振变换器(QRC)和PWM变换器或更先进的变换器相比, 电路要简单, 这也是其低成本的原因。本文对比典型零电压软开关, 介绍一种新型的零电压软开关电路, 它能够一起实现主辅开关零电压的开闭操作。主开关上并无额外电压以及电流应力, 全部一极管都达到了软换流, 这样将有效降低损耗。

关键词 零电压 软换流 谐振变换器

中图分类号: TM56

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)12-0094-03

1 典型零电压软开关设计

图1中S为双向主功率开关, S1为单向辅助功率开关。Cr, Lr分别为谐振电容和电感, Lf和C。为滤波电路, R为负载, D为续流二极管, 为了简化分析认为元件都是理想的, 考虑到滤波电感Lf较大, 认为通过它的电基本不变, 其值等于负载电流 $I_o^{[1]}$ 。

该电路在一个周期内可分为五个工作阶段来分析, 在 T_0 之前, S, S1均导通, D关断, 通过S, Lr的电流 i_s 及 i_{Lr} 均为 I_o , 在 T_0 时刻S关断, 由于Cr的吸收作用可使零电压关断, 在S关断后, 电源对Cr恒流(I_o)充电, D两端电压线性下降, 到 T_1 时, Cr充电到 V_i , D两端电压为零而导通, 在 T_1 - T_2 阶段电流源 I_o 通过D续流, 电感Lr中电流通过S1形成环流, 电感中的能量不能释放。在 T_2 时, S1由导通到关断, S1关断后, Lr, Cr谐振, 贮存在电感中的能量对Cr放电, 在 T_3 时, Cr两端电压回零, 由于 V_{cr} 为零, S内藏二极管导通, 若此时开通S, 显然S具有零电压开通特性, 在 T_3 - T_4 阶段中电源还对电感补充能量, 电感电流线性增加, 在 T_4 时刻, 电感电流达到 I_o , 通过二极管D的电流为零, D被关断, 在 T_4 - T_0 期间, S, Lr中电流保持为 I_o , 电感两端电压为零, 若在此阶段使S1开通, 显然S1具有零电压开通特性。

1.1 典型零电压软开关仿真

已知: $V_1=48V\sim 80V$, $V_0=24V$, $P_0=48\sim 120W$, $f_s=100$ kHz, 选 $X_{max}=0.8$ 。

求得: $I_{o_{min}}=2A, I_{o_{max}}=5A, I_{半载}=3.5A, M_{max}=0.5, M_{min}=0.3, Z=25.4, \omega r=1884*103rad/s, L_r=13.5\mu H, C_r=21nF, 3.792\mu s < t_{s1} < 5.5\mu s, V_{DSmax}=207V, V_{Dmax}=80V, 3.616\mu s < t_s < 6.678\mu s, V_{DS1max}=127V, I_{smax}=5A, I_{s1max}=5A, I_{Dmax}=10A$ 。计算出的参数可用上式加以验证, 若选 t_{on} 为 $0.15\mu s$, 则有:

$$-\frac{2\omega r \cdot t_{on} \cdot V_{i_{max}}}{Z \cdot \cos \theta} = 2.97A \quad (1)$$

而 $I_{半载}=3.5A > 2.97A$ 说明参数选择正确。S、S1选用IFR245, 其参数 $V_{DS}=250V, I_D=13A$, 二极管选用MUR1515, 耐压150V, 电为15A。本次试验在Matlab的simulink环境下进行。

在 $I_0=3.5A$ 时, 能满足零电压开通条件, 在 $t_o=5A$ 时, 也能满足零电压开通条件, 但此时谐振电容峰值电压较大, 约为3倍输入电压, 而在 $i_o=2A$ 时, 谐振电容电压在 T_1 时不能回零, 造成主功率开关S不能实现零电压开通, 其原因是负载较轻, 电感Lr贮存能量少, 不能使 C^* 上电荷完全释放, 若此时接通S, C, 上电压通过S导通电阻形成放电电流(如I.波形中尖峰电流)造成损耗, 但由于此时 i_o 较少, 损耗有限^[2]。

1.2 典型零电压软开关的优缺点

优点: 损耗相对较小, 工作效率比较高, 受到电磁的影响很小, 谐振过程只发生在功率晶体管的开关转换过程中而输出功率的调节是通过改变功率晶体管的占空比实现的。

缺点: 辅助开关不能实现零关断, 那么就会在关

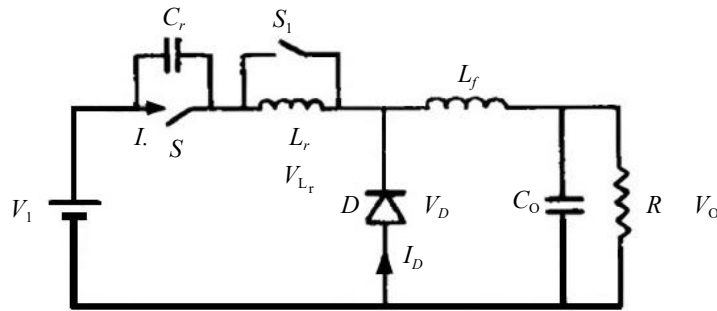


图1 BUCK 零电压 PWM 软开关电路图

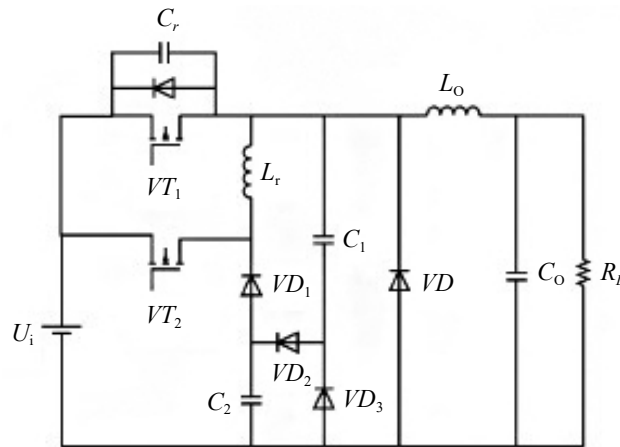


图2 新型软开关的原理图

断时产生较大的损耗。无法实现辅助开关的零电压关断，从而使得关断损耗大大增加。

2 一种新型的零电压软开关变换器的设计与分析

对于感应加热电源，以往的斩波调功基本会借助硬斩波器，以此提高电流谐波分量，增加功率开关的损耗，这会在一定程度上避免系统及开关频率的增加。基于近些年的发展，借助软开关技术能够全面降低功率开关器件的损耗，这也促使 ZVT-PWM 技术获得了普及运用，其中 ZVT-PWM 为零电压转换一脉宽调制技术的简称。因为其变换器辅助电路与开关之间是并联关系，对于 1 个开关周期，在其开通及切断的情况下，辅助电路才会出现谐振现象，别的时间电路工作则处于 PWM 状态，这显著降低了开关的损耗^[3]。但这种传统的 ZVT-PWM 变换器的辅助开关是硬关断，导致产生较大的开关损耗。针对传统 ZVT-PWM 变换器的不足，提出了一种新型软开关 Buck 变换器方案。该变换器下、辅开关均实现了软开关，没有额外的电压和电流应力，并实现了一极管的软换流，大大降低了开关损耗。

2.1 新型软开关 Buck 变换器的拓扑结构及工作原理

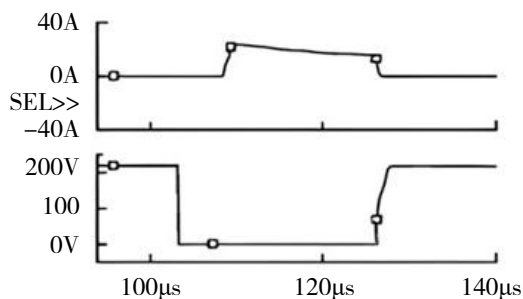
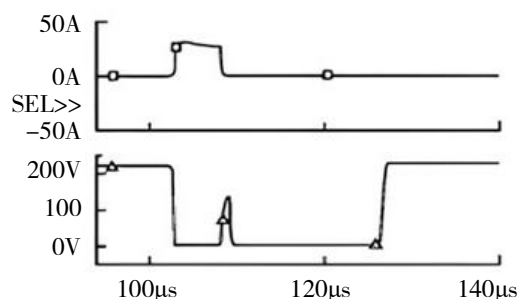
有关电路如图 2 所示，它是 PWM Buck 变换器同辅助吸收电路的有机结合。辅助吸收电路包含多个过程部分，如谐振电感、辅助二极管、辅助开等，在图 2 中分别为 L_r 、 VD_1 、 VD_2 、 VD_3 、 VT 等。

2.2 设计及仿真

为更好地开展分析工作，提出了下述几个假设情况：

- (1) 假设输入电压 U_i 连续。
- (2) 假设输出电压 U_o 连续，以及假设输出电容 C_o 相对较大。
- (3) 假设输出电流 I_o 连续，以及假设输出电感 L_o 相对较大。
- (4) 假设输出电感 L_o 极大地超出谐振电感 L_r 。
- (5) 假设谐振电路良好。
- (6) 假设半导体器件十分理想。
- (7) 假设不考虑全部一极管反向恢复的时长。

技术指标：其中包含输入、输出电压、负载电流及开关频率，有关指标依次是 220V、80V、20A 以及

图3 VT₁ 的电压、电流波形图4 VT₂ 的电压、电流波形

20kHz。具体设计如下所示：

1. 谐振电感 L_r 。如果 L_r 太小，那么流经 L_r 的电流将明显提高上升速度，将无法全面防止 VD 反向恢复电流。在工程设计中，一般选 $\Delta t_1 = t - t_0 = 0.01DT_s$ ^[4]。如此可利用式 (1) 求出 L_r 的值：

$$L_r = \frac{U_i}{i_{lr}} \Delta t_1 = \frac{0.01DT_s U_i}{I_0} \quad (1)$$

其中： D 为占空比； T_s 为采样周期。

针对具体电路，并非全部元器件都非常理想，由此，对于滤波电感 L_0 而言，其电流在开关切断过程中将逐渐下降。因此，具体开展计算过程中，可借助 L_0 上电流值来替换 (1) 中的 I_0 。

2. 电容 C_r , C_1 , C_2 的选择：

$$\frac{1}{2} C_r U_{Cr}^2 = \frac{1}{2} C_r U_i^2 = \frac{1}{2} L_r \Delta I_{Lr}^2 \quad (2)$$

为使 VT_1 零电压开通，需保证 C_r 上电能都转移至 L_r 上：

$$C_r = \frac{L_r \Delta I_{Lr}^2}{U_i^2} \quad (3)$$

VT_1 关断时刻， C_2 上的能量要在 t_f 时间内移动至 L_r 上，也就是主开关切断的时间范围内，则：

$$t_{56} = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_r C_2} \geq t_f \quad (4)$$

根据能量守恒方程：

$$\frac{1}{2} C_2 U_i^2 + \frac{1}{2} C_1 U_{cl}^2 = \frac{1}{2} L_r I_{o,max}^2 \quad (5)$$

能够求出电容 C_1 的值。

本电路采用 simulink 对 Buck 变换器电路开展了仿真，参数为： $L_r=3\mu\text{H}$ ， $C_r=0.3\text{nF}$ ， $C_1=80\text{nF}$ ， $C_2=23\text{nF}$ ， $U_i=220\text{V}$ ， $U_o=80\text{V}$ ， $I=20\text{A}$ ， $f_s=20\text{kHz}$ 。

从图 3 和 4 可看出，对于主辅开关来看，二者依次可以达到零电压以及零电流开通及关断^[5]。

3 结论

可以看到，典型零电压软开关电路中无法实现辅助开关的零关断，使得关断时的损耗大大增加，不利于开关的实现。

基于典型零电压软开关电路的缺点——无法实现辅助开关的零电压关断，从而使得关断损耗大大增加，本文介绍的新型的零电压软开关电路，新型电路可以一起促进主辅开关零电压开通及关闭。针对主开关，并无额外电压及电流应力；全部的一极管也都可以达到软换流，极大地减小了损耗。

文章对新型 Buck 变换器开展了分析，围绕其结构以及原理展开了讨论，通过有关仿真结果可知，主辅开关依次可以达到零电压及零电流开通以及关断，由此将极大地降低开关损耗；针对主开关，在这之上并未形成额外电压以及电流应力；全部一极管还都可以达到软换流，在很大程度上减小了损耗，对于这方面的研究可以为有关感应加热电源软斩波的运用提供一定的借鉴。

参考文献：

- [1] 周令琛, 陈珏. 具有准谐振缓冲器的零电压零电流切换 DC-DC 变换器 [J]. 上海第二工业大学学报, 2009, 26(04):300-305.
- [2] 谢勇, 赵修科. BUCK 零电压软开关电路分析与设计 [J]. 电子工程师, 1995(02):37-41,47.
- [3] 李维波. MATLAB 在电气工程中的应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [4] 王辉, 程坦. 直流斩波电路的 Matlab/Simulink 仿真研究 [J]. 现代电子技术, 2009, 32(05):174-175,178.
- [5] 牛犇, 宋书中, 马建伟, 等. 一种新型软开关 Buck 变换器的研究 [J]. 工矿自动化, 2009, 35(12):38-42.