

基于 Saber 的 ZVS PWM Boost 变换器的分析与仿真

刘长清¹, 王维俊¹, 卓祖讯¹, 田元军²

(1. 解放军后勤工程学院 后勤信息工程系, 重庆 401331;

2. 长虹电源厂, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为了使开关电源达到高功率密度和易于便携的要求, 采用高频 PWM (Pulse Width Modulation) 软开关控制方式, 不但利于减小开关电源的体积, 而且还能有效降低开关器件损耗和噪音。详细分析了零电压变换 ZVS (Zero Voltage Switch) PWM 脉宽调制 Boost 变换器的软开关过程及实现软开关的条件, 利用 Saber 软件对 Boost 电路在硬、软开关条件下进行了仿真验证。仿真结果表明 ZVS PWM 软开关变换技术具有开关损耗小、恒频控制和变换效率高等优点。

关键词: 软开关; 谐振回路; ZVS PWM boost; Saber

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)05-0088-04

Analysis and simulation of ZVS PWM boost converter based on Saber

Liu Changqing¹, Wang Weijun¹, Zhuo Zuxun¹, Tian Yuanjun²

(1. Department of Logistic Information Engineering, PLA Logistic Engineering University, Chongqing 401331, China;

2. Changhong Battery Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to reach the aim of high power density and portable power, the method of soft switch control was adopted to reduce the volume of power and restrain the loss and noise of power device. The operation principles of the ZVS (zero voltage switch) PWM (pulse width modulation) boost converter and the realization conditions of the soft switching were fully analyzed. The simulation was conducted by the Saber software. The results indicated that the ZVS PWM converter presented some advantages such as low switching loss, fixed frequency control, high efficiency, etc.

Key words: soft switching; resonant circuit; ZVS PWM boost; Saber

直流开关稳压电源已广泛应用于通信、计算机、工业仪器仪表、医疗、军事、航空航天等领域。目前直流开关稳压电源正朝着高效率、高频化、集成化、轻型化、绿色化的方向发展^[1]。Boost 变换器以其结构简单、易实现等优点, 广泛应用于中小功率升压场合^[2-4]。由于开关器件的开关损耗与频率成正比^[5], 在硬开关条件下提高开关频率, 使电源轻型化的过程中, 变换器的开关器件损耗增加, 感性关断电压尖峰和容性开通电流尖峰随之增大, 电磁干扰 (EMI) 也会加重。而软开关技术是解决这一矛盾的有效方法, 所谓软开关技术实际是利用电感与电容谐振, 使开关器件中电流 (或电压) 按正弦波或准正弦波规律变化。当电流过零时, 使器件关断; 当电压过零时, 使器件开通, 实现开关损耗为零^[6-7]。

Boost 电路是一种典型的 DC/DC 变换电路拓扑。质子

交换膜燃料电池发电系统中, 质子交换膜燃料电池堆的输出电压较低^[8], 在实际应用中必须进行升压, 以满足后级逆变器的需要。为了提高变换器的变换效率、降低损耗, 对传统的 Boost 变换器进行了改进。本文中的软开关 Boost 变换器, 通过采用辅助开关管和谐振电路, 实现了主开关管和二极管的软开关。相比其他的软开关变换器, 在同样的控制频率下, 既减小了开关损耗, 又提高了变换效率。Saber 是美国 Analogy 公司开发的功能强大的系统仿真软件, 它具有强大的混合信号分析功能。本文详细分析了这种变换器的工作原理、实现软开关的条件并通过 Saber 进行仿真实验验证。

1 ZVS PWM Boost 电路结构

直流电源 U_m 、输入滤波电感 L_f 、主开关管 M_1 、二极管 D_1 、输出滤波电容 C_f 和负载 R 构成基本的 Boost 电路拓扑,

技术与方法 Technique and Method

如图1所示。辅助开关管M₂、二极管D₂、D₃、谐振电感L_r和谐振电容C_r构成有源软开关环节。

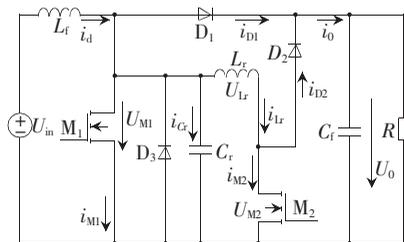


图1 ZVS PWM Boost电路

开通时，C_r和L_r构成的谐振电路可以减小并延缓主开关管M₁的开通电流上升率di/dt，使得M₁和D₁具有ZVON环境，可有效减少开关损耗。在关断时，与M₁并联的电容C_r可以有效抑制主开关管关断时的电压上升率du/dt，为M₁和D₁营造ZVOFF环境，可有效减少关断损耗。二极管D₂、D₃起到续流和换流的作用。

2 电路工作过程分析

对Boost电路做如下分析，假设：

(1) 输入滤波电感L_l足够大，在一个开关周期内电流近似为恒值i_d=I_{in}，与输入电源U_{in}一起构成等效恒流源；

(2) 输出滤波电容C_r足够大，与负载R一起等效为恒值电压源；

(3) 除主、辅开关管和二极管以外，其余元件均具有理想特性。

电路进入稳定工作状态后，整个开关周期可以分为8个工作状态，在一个周期内各阶段等效电路如图2所示，各图中粗线表示实际的电流路径。各阶段分述如下：

状态1(t₀~t₁)：t₀时刻之前，主开关管M₁和辅助开关管M₂已关断，电路处于D₁稳定导通状态。在t₀时刻，辅助开关管M₂导通，二极管D₁在反向恢复电流的作用下仍然导通，谐振电容被嵌位，谐振电感电流线性上升，在t₁时刻i_{D1}与i_{Lr}完成线性换流，D₁完成反向恢复。在该阶段D₁具有ZCZVOFF环境。此时有：

$$U_{Cr} = U_{Lr} = U_{M1} = U_0 \quad (1)$$

$$i_{D1} = I_{in} = i_{Lr} \quad (2)$$

$$i_{Lr} \frac{U_0}{L_r} = (t - t_0) \quad (3)$$

状态2(t₁~t₂)：t₂时刻D₁关断，C_r的嵌位作用消失，在C_r、L_r谐振作用下i_{Lr}继续上升，能量从C_r向L_r传递。此时有：

$$i_d = i_{Cr} + i_{Lr} \quad (4)$$

$$i_{Cr} = C_r \frac{dU_{Lr}}{dt} \quad (5)$$

状态3(t₂~t₃)：C_r继续放电，在谐振作用下其端压方向使D₃导通，谐振电感电流达到最大值，U_{Lr}被嵌位为零。

状态4(t₃~t₄)：辅助开关管截止，为维持i_{Lr}连续，L_r端压瞬时反向并使D₂导通，i_{Lr}迅速线性下降，致使D₃具有ZCZVOFF环境。在M₂截止瞬间，由于D₃的反向恢复作用

使得M₁具有ZVON环境，i_{M1}迅速线性上升。在t₄时刻，D₁与M₁之间的换流结束。此时有：

$$\frac{di_{Lr}}{dt} = -\frac{U_0}{L_r} \quad (6)$$

状态5(t₄~t₅)：这一阶段M₁稳定导通，有i_{M1}=I_{in}，使得i_{Lr}为零，D₂具有ZCOFF。负载电流由输出滤波电容释放能量维持。

状态6(t₅~t₆)：主开关管M₁关断，i_{M1}迅速向i_{Cr}线性换流，此时将对谐振电容开始充电，由于C_r较大且换流时间很短，可近似认为M₁具有ZVOFF。

状态7(t₆~t₇)：在i_{Cr}=I_{in}极短的恒流充电时间内，U_{M1}迅速线性上升，U_{D1}迅速线性下降，当U_{D1}=0时，D₁具有ZVON，U_{M1}被嵌位为U₀，i_{Cr}瞬间全部转入i_{D1}中，i_{M1}向i_{D1}的换流过程完成。

状态8(t₇~t₈)：i_{M1}与i_{D1}的换流过程完成之后，进入D₁稳定导通阶段，电路处于普通PWM控制方式下主开关管关断时的工作状态，能量由输入直流源U_{in}向负载传递，至此一个开关周期结束，准备进入下一个周期的辅助开关管M₁开通，如图2所示。此时有：

$$i_d = i_{D1} = I_0 \quad (7)$$

$$U_{M1} = U_{M2} = U_0 \quad (8)$$

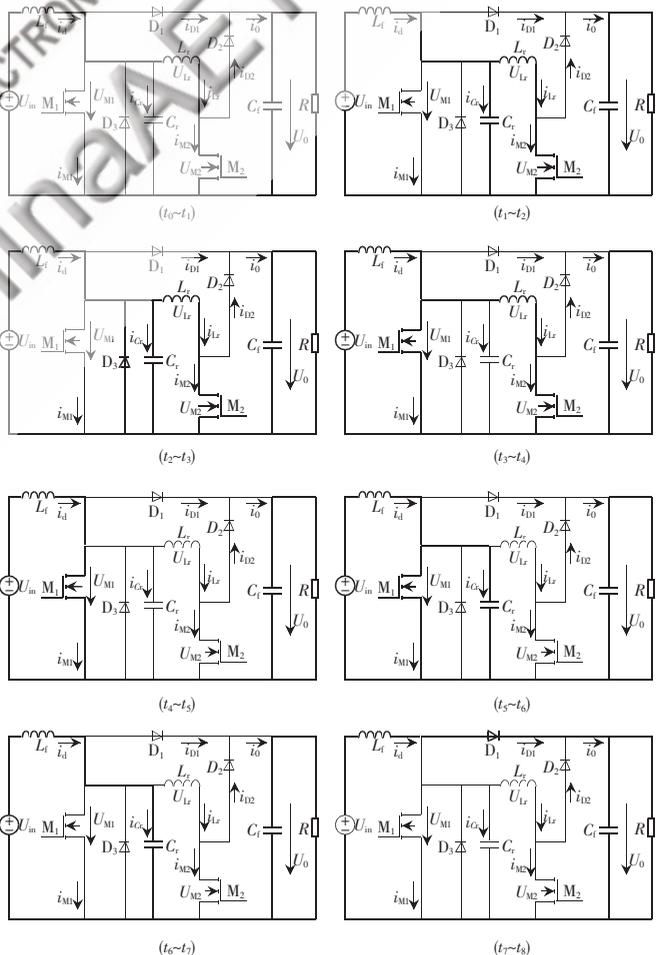


图2 ZVS PWM Boost电路各工作模式等效电路图

技术与方法 Technique and Method

3 软开关工作条件

软开关环节的正常工作的,需要确保在一个开关周期内所吸收的能量能够完全转移到负载中去。根据式(1)~式(5)及初始条件, i_{Lr} 与 i_{D1} 的换流时间可以由式(9)表示,谐振时间由式(10)表示。对本文中所述的电路,需要在 M_1 开通前使得 U_{M1} 降为零,为此需要辅助开关管 M_2 的触发信号上升沿超前于主开关管 M_1 触发信号上升沿的时间 T (即延迟时间)大于换流时间 t' 和谐振时间 t'' 之和,其关系表示为:

$$t' = t_1 - t_0 = L_r I_m / U_0 \quad (9)$$

$$t'' = t_2 - t_1 = \pi \sqrt{L_r C_r} / 2 \quad (10)$$

$$T > t' + t'' \quad (11)$$

4 主要参数设计

ZVS PWM Boost电路的设计指标为: $U_{in}=30\text{ V}$, $U_{out}=60\text{ V}$, 负载 $R=200\ \Omega$, 输入电流纹波 $<5\%$, 输出电压纹波为 1% , $f_s=10\text{ kHz}$, 占空比 $D=0.5$ 。

4.1 输入滤波电感和输出滤波电容的选取

输入滤波电感 L_r 和输出滤波电容 C_r 应该分别满足输入电流纹波和输出电压纹波的要求, 根据参考文献[9]中的公式可以分别求出 L_r 和 C_r :

$$\frac{D(1-D)U_{out}}{L_r f_s} = \Delta I_m \leq 5\%$$

$$\text{得 } L_r = 100\text{ mH}$$

$$\frac{DU_{out}}{R f_s C_r} = \Delta U_{out} \leq 1\%$$

$$\text{得 } C_r \geq 25\ \mu\text{F}, \text{ 实际中取为 } C_r = 30\ \mu\text{F}.$$

4.2 谐振电感 L_r 和谐振电容 C_r 的选取

谐振电感 L_r 的主要作用是保证二极管 D_1 软关断, 降低其反向恢复电流引起的损耗, 同时起到抑制辅助开关管 M_2 的电流上升率, 从而降低其开关损耗。因此, 电路中 L_r 的实际值是根据二极管电流的反向恢复时间 t_{rr} 来确定^[10]。一般按式(12)取3倍的反向恢复时间计算谐振电感 L_r 的值^[11]。本文的快速恢复二极管选用MUR460, 取 $t_{rr}=60\text{ ns}$, 得 $L_r=18\ \mu\text{H}$ 。

$$L_r = 3t_{rr}U_0/I_m \quad (12)$$

谐振电容 C_r 的主要作用是限制主开关管 M_1 的电压上升率, 同时降低开关管关断时的电压尖峰值, 以保护开关管正常工作。实际的谐振电感 C_r 值是主开关管的寄生电容值和外加电容值之和。由于较大的谐振电容 C_r 将在主开关管开通时加大损耗, 难以实现零电压开通。因此, 实际中的谐振电容值一般很小, 本文中取谐振电容 $C_r=1\text{ nF}$ 高频陶瓷电容。

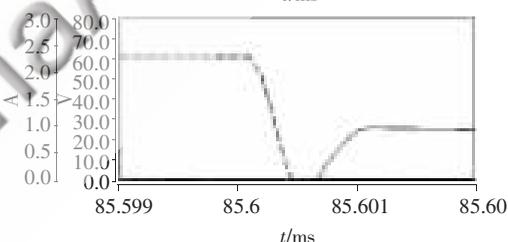
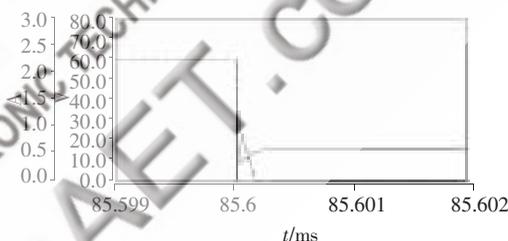
谐振频率 f_r 一般取开关频率 f_s 的5~10倍。若过高, 谐

振电流峰值太大; 若过低, 主回路的占空比利用率低, 会造成输入电流的畸变和输出电压的不稳。所以, 在满足谐振频率的要求下, 根据得出的谐振电感值和谐振电容值, 可以计算出延迟时间 $T=389\text{ ns}$ 。

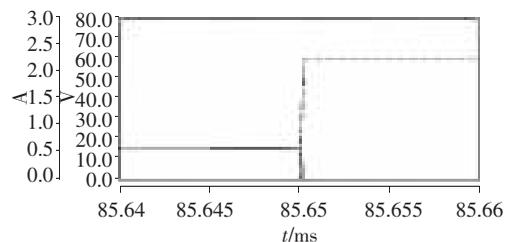
5 仿真试验及结果分析

为了验证以上ZVZCS全桥变换器工作原理及上述分析的正确性, 本研究对ZVS PWM Boost电路进行了仿真设计。仿真软件使用Saber, 在Saber/Sketch环境下建立仿真模型。根据分析计算出的参数结果选择主要仿真器件为: 主、辅开关管IRF150, D_1 为MUR460, D_2 、 D_3 为MUR1540。

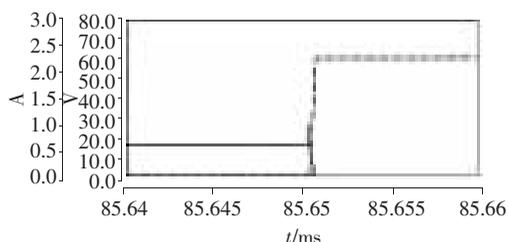
仿真结果分别为图3、图4、图5所示。图3为主开关管在硬、软开关条件的开通、关断的电压、电流波形图。图4为续流二极管 D_1 在硬、软开关条件的电压、电流波形图。图5为在硬软开关条件下输出电压、电流波形图。从仿真波形图形可以看出, 由于谐振环节的作用, 主开关



(a)硬开关条件



(b)软开关条件

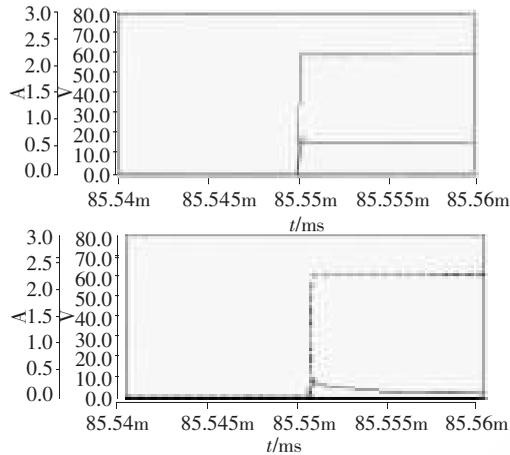


(b)软开关条件

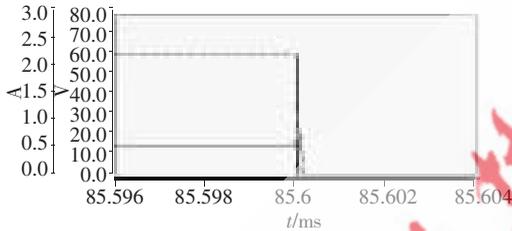
图3 M_1 在硬、软开关条件下的开通和关断波形

技术与方法 Technique and Method

管 M_1 和续流二极管 D_1 都实现了软开关,有效降低了开关损耗。同时,使得输出电压、电流均值增大,提高了变换器工作效率。



(a)硬开关条件



(b)软开关条件

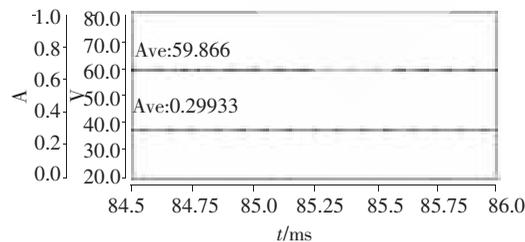
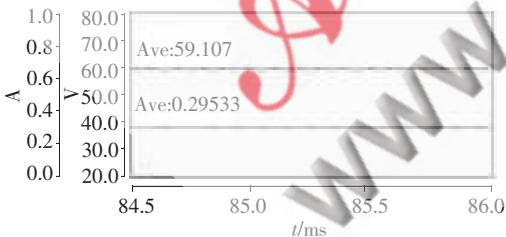
图4 D_1 在硬、软开关条件下的开通和关断波形

图5 硬、软开关条件下的输出电压、电流波形

从理论分析和仿真结果可以看出,由于谐振电路、ZVS PWM Boost电路可以实现主开关管的零电压开通

和零电流关断,并使续流二极管具有软开关环境,从而有效减少了开关损耗,在一定程度上抑制了噪声。变换效率明显提高,节能效果明显,且开关频率固定、易于实现控制,更适用于中小功率变换器。

参考文献

- [1] 吴忠强,王志君.DC/DC变换器的一种无源控制方案[J].电机与控制学报,2008,12(2):147-150.
- [2] SANTI E, MONTI A, Li Donghong, et al. Synergetic control for DC/DC Boost converter: Implementation Options [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2003, 39(6): 1803-1813.
- [3] 史立生,赵振东,陈丽敏.升压式ZVT2PWM软开关变换技术研究[J].华北电力大学学报,1998,25(3):93-97.
- [4] CH M H. Review of Power Factor Correction Techniques[C]. IPEMC'97,1997.
- [5] 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.
- [6] 周志敏,周纪海.开关电源实用技术设计与应用[M].北京:人民邮电出版社,2003.
- [7] HUAN G, Liu Chingshan, Jiang Yimin, et al. Novel zero-transition PWM converters [J], IEEE Transactions on Power Electronics, 1994,9(2):213-219.
- [8] HEIDECK G, PURMANN M, STYCZYNSKI Z. Multi channel voltage control for fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2005, 14:594-597.
- [9] SHEPHERD W, Li Zhang.电力变流器电路[M].沈经,张正南译.北京:机械工业出版社,2008.
- [10] 曹建安,王兆安.UC3855的应用与ZVT PFC电路的设计[J].电力电子技术,2000,12(6):49-51.
- [11] 黄俊来.一种零电压转换有源功率因数校正电路的研究[J].通信电源技术,2006,23(6):10-12.

(收稿日期:2010-09-02)

作者简介:

刘长清,男,1983年生,硕士研究生,主要研究方向:开关电源及其智能控制。

王维俊,女,1964年生,教授,主要研究方向:移动电源及其控制技术。

卓祖讯,男,1985年生,硕士研究生,主要研究方向:智能开关及其控制技术。