

灵活直流环节型全软开关逆变器

赵徐森¹, 张卫平¹, 吴兆麟², 李 洁³

(1. 北方工业大学, 北京 100041; 2. 浙江大学, 浙江杭州 310027; 3. 北京电子科技学院, 北京 100039)

摘 要: 本文提出了灵活直流环节型全软开关逆变器. 其主要贡献如下: (1) 给出了以 Buck 电路为直流环节的全软开关逆变器; (2) 给出了最小电压、电流应力的全软开关 Buck 型 DG DC 变换器的理论分析; (3) 给出了这种逆变器的控制策略. 仿真结果和实验结果 (2.7kW) 证明了这个电路优于谐振型直流环节型逆变器.

关键词: 直流环节; 软开关; 逆变器; 控制策略

中图分类号: TM 46 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 02-0210-03

A Flexible DC Link-Global Soft Switch Full Bridge Inverter

ZHAO Xu sen¹, ZHANG Wei ping¹, WU Zhao-lin², LI Jie³

(1. North China University of Technology, Beijing 100041 China;

2. Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027 China;

3. Beijing Electronic Science and Technology Institute, Beijing 100039 China)

Abstract: A flexible DC link global soft switch full bridge inverter for MH (Metal Halide) lamps has been proposed. The main contributions of the paper are as follows: (1) A new topology about DC link, using Buck converter as DC link, has been given out; (2) A ZCS-ZVS PWM Buck converter has been analyzed; (3) A new controlling strategy for the inverter has been developed. The results of the simulation and experiments (with output power of 2.7kW) provided in the paper have shown that the new inverter has many merits.

Key words: DC link; soft switch; inverter; controlling strategy

1 工程背景与介绍

本文提出了灵活直流环节型全软开关方波逆变器, 其工程背景是用于 MH (Metal Halide) 灯用镇流器. 为了消除频闪, 逆变器的输出应为平稳的正负对称的方波电压, 且交替时间应该越短越好, 但是若交替时间太短, 会使 MH 灯和电源产生共振, 并对外辐射较大的 EMI, 对摄像机产生一定的影响且不能进行同期录音. 解决的办法是: 当拍高速镜头时, 一般不需同期录音, 使得交替时间尽可能短; 而当拍低速镜头时, 增大交替时间, 消除噪声. 在这个工程背景下, 本文提出了灵活直流环节型全软开关逆变器, 其主要特点为: 直流环节的输出电压的幅度是灵活可调的; 直流环节的输出电压为零的时间起点和宽度是灵活可控的; 实现了全软开关且所有开关的电压应力和电流应力最小. 灵活直流环节型全软开关逆变器是以 MH 灯用无频闪电子镇流器为工程背景设计的, 实际上这个电路还可以应用于其它负载.

2 全软开关 Buck 电路

全软开关 Buck 电路如图 1 所示. 其主要工作波形如图 2 所示. 由图 2 可知, 电路实现了最小电流应力和最小电压应

力. 在图 1 中, L_1 , C_1 为谐振元件, S_1 为主开关, S_2 为辅助开关. 为了便于分析, 假定①图 1 中所有元器件为无损耗, 无惯性的理想元器件; ②电感 L_1 足够大, 在一个开关周期内, 近似认为电感上的电流维持为一个常数 I_o . 下面分七个时间段对此电路进行稳态分析.

① $T_0 \sim T_1$ 阶段, 电感电流线性上升阶段, 初态: D_1 续流, 其余二二极管及开关管均处于关断状态. 当 $t = T_0$ 时, 辅助开关 S_2 导通, L_1 上的电流为:

$$i_{L1}(t) = i_{S2}(t) = U_i / L_1 t, t \in [T_0, T_1] \quad (1)$$

由上式可知, S_2 为 ZCT 开启. 在这一个阶段, S_2 与 D_1 换流. 当 $t = T_1$ 时, $i_{L1}(T_1) = I_o$.

② $T_1 \sim T_2$ 阶段, 电感电流恒定阶段. 当 $t = T_1$ 时, D_1 停止续流, $i_{L1}(t) = I_o$, 在此阶段 S_2 上的电流恒定.

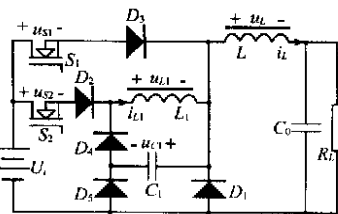


图1 全软开关 Buck 电路

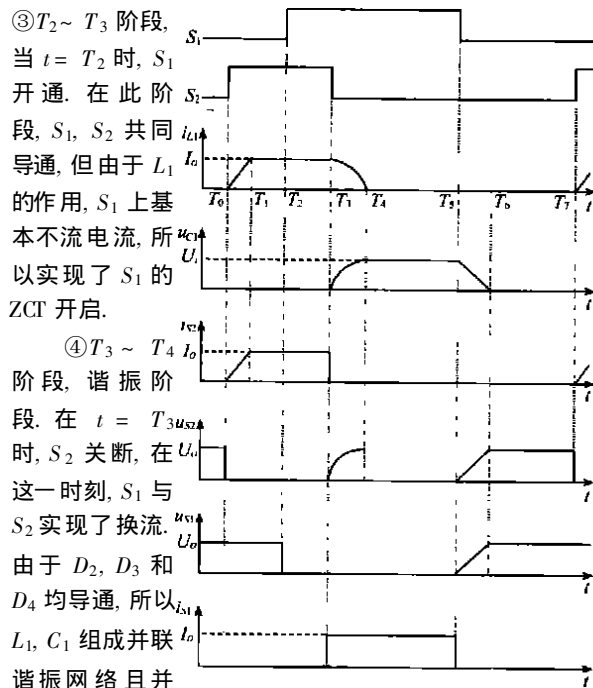


图2 全软开关 Buck 电路的主要波形

使 S_2 实现了 ZVT 关断, 为了实现 S_1 开关的 ZVT 关断, L_1 上的储能必须满足下式:

$$\frac{1}{2} L_1 I_o^2 = \frac{1}{2} C_1 U_i^2 \quad (2)$$

当 $t = T_4$ 时, $u_{C1}(T_4) = U_i$. 此刻, D_4 关断, 谐振停止, 并且 C_1 上的电压保持到 S_1 关断, 为 S_1 实现 ZVT 关断创造了条件.

⑤ $T_4 \sim T_5$ 阶段, S_1 导通阶段且为正常的 PWM 工作状态.

⑥ $T_5 \sim T_6$ 阶段, 主开关 S_1 零电压关断.

当 $t = T_5$ 时, S_1 关断, D_5 导通, S_1 的端电压为:

$$u_{S1} = I_o t / C_1, t \in [T_5, T_6] \quad (3)$$

由上式可知, S_1 的端电压逐渐升高, 实现了 S_1 的零电压关断. 当 $t = T_6$ 时, $u_{C1} = 0$, $u_{S1} = U_i$.

⑦ $T_6 \sim T_7$ 阶段, 当 $t = T_6$ 时, D_5 关断, D_1 开始续流进入正常的 PWM 工作状态.

为了实现 S_1 的 ZVT 关断, C_1 的取值应足够大. 但 C_1 的取值过大, 会造成如下的不利因素: 首先, C_1 过大使 $(T_6 - T_5)$ 的时间增长, 限制了开关频率的提高; 其次, 为了实现 S_1 的 ZVT 关断, 必须满足式(2). 由式(2)可知, C_1 增大, L_1 增加. 由式(1)可知, L_1 增加, 会导致 $(T_1 - T_0)$ 的时间增长, 限制了斩波频率的提高. 总之, S_1 的 ZVT 关断与提高斩波频率是相互矛盾的.

3 灵活直流环节型全软开关逆变器及控制策略

灵活直流环节型全软开关逆变器的原理电路如图 3 所示. 在图中, S, D_1 和 L 组成了没有电容的 Buck 电路(MH 灯不允许有输出电容, 且在稳态时, 其端电压为恒定值). 输出电压 $U_{O1} = DU_i$, U_{O1} 为输出电压的平均值. 当改变占空比 D 时,

输出电压也随之改变, 实现了输出电压可调的功能. $S_1 \sim S_4$ 组成了方波逆变器. R_L 为 MH 灯稳态时的等效电阻. D_2 为能量回馈提供了通路.

灵活直流环节型全软开关逆变器的主要工作波形如图 4 所示, 其主要控制波形如图 5 所示. 在图 5 中, u_{OS2} 是振荡器 (OSC) 的方波输出信号, u_{g13} 是 S_1 和 S_2 的控制信号, u_{g24} 是 S_2 和 S_4 的控制信号, u_3 是计数器的输出信号, u_1 是定时器的输出信号, u_c 是误差放大器 A_2 的输出信号.

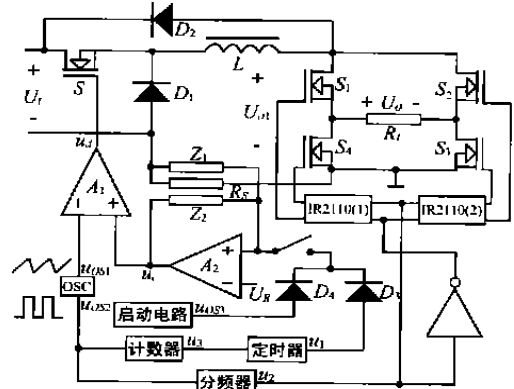


图3 灵活直流环节型全软开关逆变器的原理图

控制策略:

① $t \in [t_1, t_2]$, L 放电阶段. 当 $t = t_1$ 时, 定时器的输出电压 u_1 发出一个高脉冲, 该脉冲的宽度为 $t_w = t_3 - t_1$, 该脉冲的幅值足以使放大器 A_2 的输出为零, 因此在 $t \in [t_1, t_3]$ 期间内, Buck 电路中的开关 S 处于关断状态. 由于电感 L 的储能作用, 有下面表达式:

$$u_{O1}(t) = I_{om} R_L e^{-t/\tau}, \tau = \frac{L}{R_L}, t \in [t_1, t_2] \quad (4)$$

式中 i_L 是电感的瞬态电流, I_{om} 是电感电流的初值, $I_{om} = U_{om}/R_L$.

② $t \in [t_2, t_3]$, 逆变器的臂间换流期. 当 $t = t_2$ 时, $i_L(t) \approx 0$, $u_{O1}(t) \approx 0$, 逆变器在该期间进行臂间换流. 因为 $u_{O1}(t) = 0$, 所以 $S_1 \sim S_4$ 一定是 ZVT 开关, 在理论上实现了无损耗换流. 因为时间起点 t_1 和时间宽度 t_w 均是由计数器和定时器决定的, 所以这两个参数均可灵活控制, 完全可以实现解耦控制.

③ $t \in [t_3, t_4]$, 电流上升阶段. 当 $t = t_3$ 时, 逆变器已经完

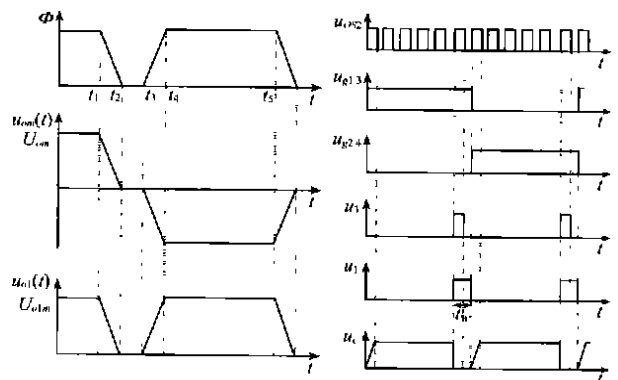


图4 有频闪无噪声状态的主要工作波形 图5 主要控制波形

成了臂间换流, 定时器停止输出高脉冲且启动电路开始工作, 使 Buck 的输出电流平均值按照负载的要求规律上升, 且当 $t = t_4$ 时, 电路进入稳态. 为了加速启动速度, 在启动电路工作时, 所有的反馈均不起作用. 当电感电流上升到额定值时, 启动电路停止工作, 同时反馈系统开始工作.

④ $t \in [t_4, t_5]$, 稳定工作阶段. 当 $t = t_4$ 时, 启动电路停止工作, 电路进入稳态. 在这个阶段 Buck 电路采取平均电流控制. 电流的采样信号是采样电阻 R_s 两端的电压. 这时改变参考电压 U_R 可以改变输出电流, 达到输出电压及输出电流可调的目的.

4 仿真及实验结果

实验结果: 输出功率 $P_o = 2.7 \text{ kW}$, 输出电流 $I_o = 23.5 \text{ A}$, 输出电压 $U_o = 115 \text{ V}$, 效率 $\eta = 92\%$. 仿真得出的图 3 所示电路中各个开关的动态负载线如图 6 所示. 图 1 所示 Buck 电路主、辅开关的实验波形分别如图 7 和图 8 所示, 其输出电压波形如图 9 所示. 文献[5]给出了详细的仿真和实验结果.

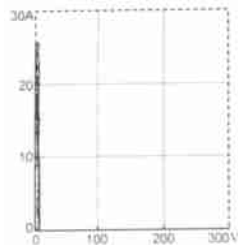


图 6 各个开关的动态负载线

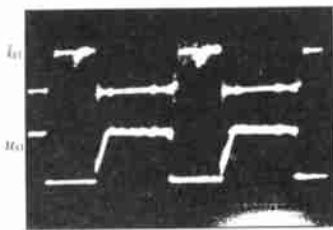


图 7 Buck 电路主开关 S_1 的实测波形

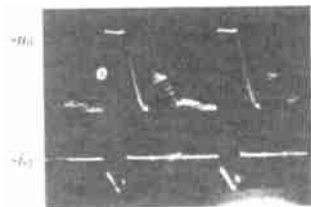


图 8 Buck 电路辅开关 S_2 的实测波形

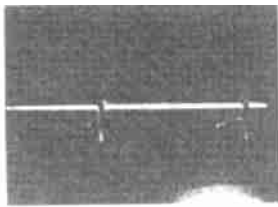


图 9 Buck 电路输出电压的实测波形

5 结论

本文以 MH 灯用电子镇流器为工程背景, 提出了灵活直流环节型全软开关逆变器. 理论分析、仿真结果和实验结果 (2.7 kW) 证明了这个电路优于谐振型直流环节型逆变器. 由于采用了平均电流控制模式, 只要给定输出电流的变化规律, 电路总具有良好的跟踪性能. 文中的理论分析、仿真结果和实验结果基本一致, 证明了这种电路是完全可行的.

参考文献:

- [1] Osram. Lighting Program Photo Optics', 92/93 [C].
- [2] Dvian D M. The resonant DC link converter A new concept in static PWM converter [A]. IAS' 86 [C], 1986: 648-656.
- [3] 张卫平, 张英儒, 王世举, 吴兆麟. MH 灯的电气模型及电子电源控制规律研究 [J]. 电子学报, 1999, 27(8): 142-143.
- [4] 刘春燕, 李含善, 周绍英. 具有谐振环节的逆变器及其调速系统 [J]. 控制与决策, 1993, 8(5): 367-370.
- [5] 张卫平. 交流无频闪 MH 灯用电子电源的研究 [J]. 浙江大学博士论文, 1998.

作者简介:



赵徐森 男. 1968 年出生于江西省. 工程师, 目前在北方工业大学工学院从事科研与实验研究工作, 主要研究方向为检测技术和功率电子学.



张卫平 男. 1957 年出生于陕西省. 博士, 现任北方工业大学工学院教授, 一直从事微电子学和功率电子学方面的科研与教学工作, 在国内外学术期刊发表论文三十多篇.