

## 辅助电路与负载并联的 新型单相全桥软开关逆变器

王 强<sup>1,2</sup>, 王有政<sup>1,2</sup>, 王天施<sup>1,2</sup>, 刘晓琴<sup>1,2</sup>

(1. 辽宁石油化工大学信息与控制工程学院, 辽宁抚顺 113001;

2. 辽宁石油化工大学石油化工过程控制国家级实验教学示范中心, 辽宁抚顺 113001)

**摘 要:** 为优化单相全桥逆变器的效率, 提出了一种新型单相全桥软开关逆变器, 其输出端设置了1组与负载并联的辅助电路. 在辅助电路处于工作状态时, 逆变器桥臂上的主开关能完成零电压软开通和零电流软关断, 使该逆变器能通用于中小功率领域和大功率领域. 分析了1个开关周期内的逆变器工作流程. 在3kW样机上的实验结果表明开关器件实现了软切换, 样机在额定功率下的效率达到99.1%. 因此, 该拓扑结构对于优化单相全桥逆变器的性能具有重要意义.

**关键词:** 逆变器; 负载; 辅助谐振电路; 零电压开通; 零电流关断

**中图分类号:** TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)05-1036-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.05.026

## A Novel Single-Phase Full-Bridge Soft-Switching Inverter Including Auxiliary Circuits Parallel with Load

WANG Qiang<sup>1,2</sup>, WANG You-zheng<sup>1,2</sup>, WANG Tian-shi<sup>1,2</sup>, LIU Xiao-qin<sup>1,2</sup>

(1. College of Information and Control Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun, Liaoning 113001, China;

2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Petrochemical Process Control, Fushun, Liaoning 113001, China)

**Abstract:** In order to optimize the efficiency of single-phase full-bridge inverter, a single-phase full-bridge soft-switching inverter is proposed. The auxiliary circuit is parallel with the load at the output end of the inverter. When the auxiliary circuit is in working state, the main switches on the bridge arm of the inverter can accomplish zero-voltage turn-on and zero-current turn-off so that the inverter can be generally used in the medium and small power field and high power field. The working process of the inverter in a switching period is analyzed. The experimental results on a 3kW prototype show that the switching devices achieve soft-switching, and the efficiency of the prototype reaches 99.1% at the rated power. Therefore, this topology is of great significance for optimizing the performance of single-phase full-bridge inverters.

**Key words:** inverter; load; auxiliary resonant circuit; zero-voltage turn-on; zero-current turn-off

### 1 引言

逆变器在传统硬开关模式下高频工作时, 电压和电流重叠区产生的高开关应力会导致大量开关损耗, 电磁干扰和谐波污染. 软开关技术可以有效解决上述问题, 软开关技术分为两种: 一种是零电压软切换, 另一种是零电流软切换. 工作原理是利用增设的辅助谐振电路, 有效降低开关切换过程中的电流和电压之间的

重叠区, 降低开关损耗, 实现逆变器高频节能运行.

金属氧化物半导体场效应晶体管 (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET) 通常作为中小功率逆变器的开关器件, 绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 通常作为大功率逆变器的开关器件, 因此如果逆变器的主开关同时具备零电压开通和零电流关断的功能, 意味着该逆变器既可以使用 MOSFET 作为开关器件, 应用到中小功率领

收稿日期: 2019-03-06; 修回日期: 2019-03-31; 责任编辑: 覃怀银

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究经费项目 (No. L2019017); 辽宁省自然科学基金指导计划项目 (No. 20170540586); 辽宁石油化工大学国家级科研项目培育基金 (No. 2016PY-016)

域,又可以使用 IGBT 作为开关器件,应用到大功率领域.但是在文献[1~5]提出的单相全桥软开关逆变器中,主开关不同时具有零电压软开通和零电流软关断的功能.

为优化单相全桥逆变器的效率,本文提出了一种辅助电路与负载并联的新型单相全桥软开关逆变器,相比于其他文献中的单相全桥软开关逆变器的优势是:主开关同时具有零电压软开通和零电流软关断的功能,使该单相全桥软开关逆变器拓扑结构在中小功率领域和大功率领域具有通用性.本文详细分析了电路在 1 个开关周期内的工作流程,在 3kW 实验样机上验证了该逆变器的有效性.

## 2 电路工作过程分析

### 2.1 电路结构

本文提出的软开关逆变器主电路拓扑如图 1 所示,主电路由 3 部分构成.第 1 部分是直流电源  $U_d$ ;第 2 部分是由主开关  $S_1 \sim S_4$  及其反并联二极管  $D_1 \sim D_4$ ,负载电感  $L$  和负载电阻  $R$  组成的单相全桥逆变电路;第 3 部分是由 2 个谐振电容  $C_{r1}$  和  $C_{r2}$ 、2 个谐振电感  $L_{r1}$  和  $L_{r2}$ 、2 个辅助开关  $S_{a1}$ 、 $S_{a2}$  及其反并联二极管  $D_{a1}$ 、 $D_{a2}$  组成的与负载并联的辅助谐振电路.为方便分析电路,作出以下假设:(1)电路中所有元器件均处于理想工作状态;(2)负载电感值足够大,在 1 个开关周期内的负载电流  $I_0$  可看作固定值,逆变器输出端可看作与恒流源相连.各部分电压和电流的正方向已在图 1 中标出.

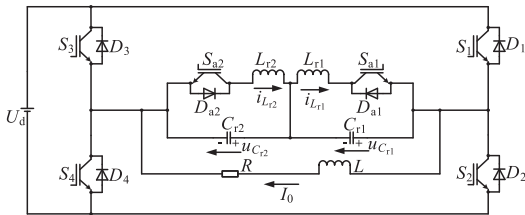


图1 辅助电路与负载并联的单相全桥谐振极软开关逆变器主电路

### 2.2 电路的工作流程

在电路每个开关周期的工作过程划分为 16 个工作流程,图 2 给出了电路的特征工作波形,图 3 给出了各工作流程的等效电路图.

流程 1 ( $t \sim t_0$ ):流过  $S_1$  和  $S_4$  的电流大小等于负载电流  $I_0$ ,  $u_{Cr1}$  为  $-U_d$ ,  $u_{Cr2}$  为  $2U_d$ ,没有电流流过辅助谐振电路,电路工作在稳定状态.

流程 2 ( $t_0 \sim t_1$ ):在  $t_0$  时刻,开通  $S_{a1}$ ,  $L_{r1}$  限制了  $S_{a1}$  发生开通动作时的电流上升速度,因此  $S_{a1}$  在开通时处于零电流软开通状态.从  $t_0$  时刻开始,  $L_{r1}$ 、 $C_{r1}$  和  $C_{r2}$  同时进入谐振状态.在  $t_1$  时刻,流过  $S_1$  和  $S_4$  的电流变为零,  $i_{Lr1}$  正向增大到  $2I_0$ ,流程 2 结束.

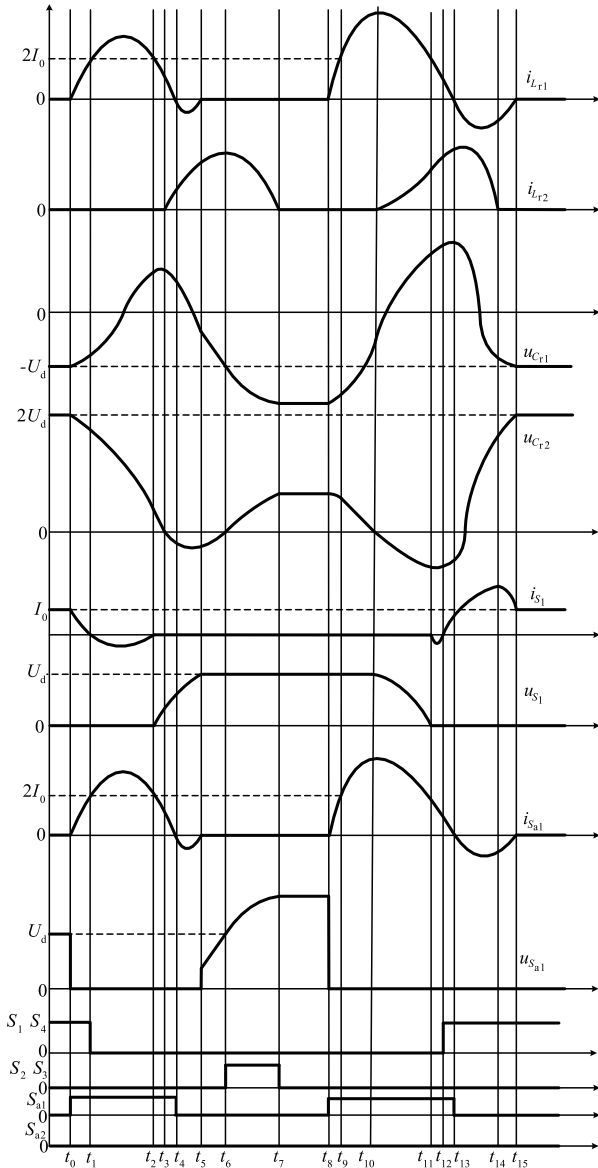


图2 谐振换流期间的理论工作波形

流程 3 ( $t_1 \sim t_2$ ):因为流过  $S_1$  和  $S_4$  的电流在  $t_1$  时刻已等于零,所以在  $t_1$  时刻,关断  $S_1$  和  $S_4$ ,则  $S_1$  和  $S_4$  实现了零电流软关断.在该流程中,电流流过  $D_1$  和  $D_4$ ,  $L_{r1}$ 、 $C_{r1}$  和  $C_{r2}$  处于谐振状态,  $i_{Lr1}$  从  $2I_0$  开始正向增大.在  $t_2$  时刻,  $i_{Lr1}$  正向减小到  $2I_0$ ,  $D_1$  和  $D_4$  截止,流程 3 结束.

流程 4 ( $t_2 \sim t_3$ ):负载电流通过  $L_{r1}$ 、 $S_{a1}$ 、 $C_{r1}$  和  $C_{r2}$  所在的支路续流.该流程中,流过  $C_{r2}$  的电流恒等于  $I_0$ ,  $L_{r1}$ 、 $C_{r1}$  处于谐振状态,  $i_{Lr1}$  从  $2I_0$  开始正向减小.在  $t_3$  时刻,当  $u_{Cr2}$  减小为零时,流程 4 结束.

流程 5 ( $t_3 \sim t_4$ ):从  $t_3$  时刻开始,电流开始流过  $D_{a2}$ ,  $L_{r1}$ 、 $L_{r2}$ 、 $C_{r1}$  和  $C_{r2}$  同时进入谐振状态,  $i_{Lr2}$  从零开始正向增加,  $u_{Cr2}$  从零开始反向增大.在  $t_4$  时刻,当  $i_{Lr1}$  减小到零时,流程 5 结束.

流程 6 ( $t_4 \sim t_5$ ):在  $t_4$  时刻,关断  $S_{a1}$ ,因为在关断  $S_{a1}$

前,流过其电流已为零,因此  $S_{a1}$  实现了零电流软关断. 始反向增大. 当  $i_{Lr1}$  变为零, 流过  $D_{a1}$  电流变为零时, 流程  
 电流流过  $D_{a1}$ ,  $L_{r1}$ ,  $L_{r2}$ ,  $C_{r1}$  和  $C_{r2}$  处于谐振状态,  $i_{Lr1}$  从零开 6 结束.

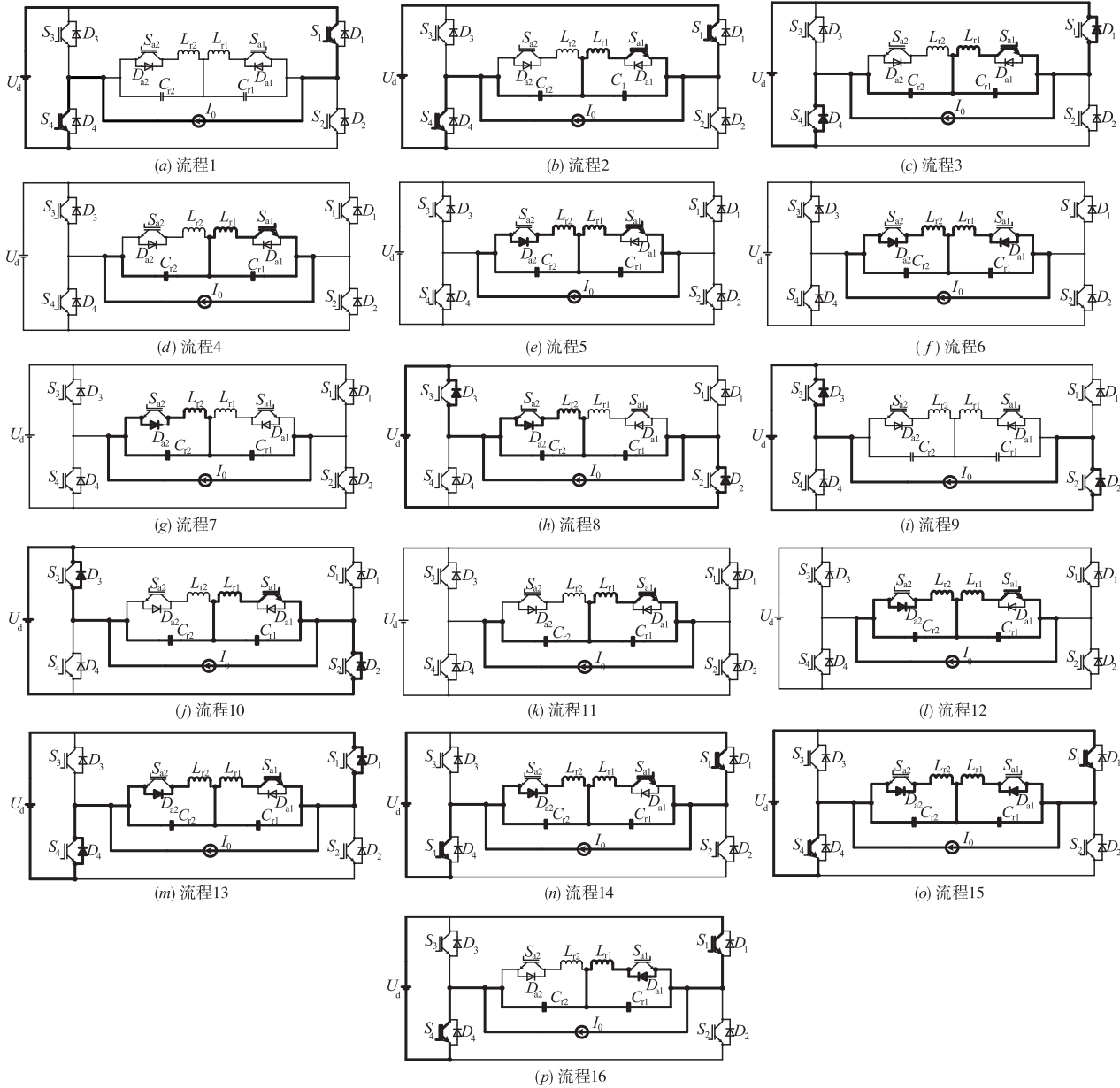


图3 各工作流程的等效电路图

流程 7 ( $t_5 \sim t_6$ ): 在  $t_5$  时刻, 负载电流通过  $L_{r2}$ 、 $D_{a2}$ 、 $C_{r1}$  和  $C_{r2}$  所在的支路续流. 该流程中, 流过  $C_{r1}$  的电流恒等于  $I_0$ ,  $L_{r2}$ 、 $C_{r2}$  继续处于谐振状态. 在  $t_6$  时刻, 当  $u_{cr1}$  反向增大到  $U_d$ ,  $u_{cr2}$  变化为零时, 流程 7 结束.

流程 8 ( $t_6 \sim t_7$ ): 在  $t_6$  时刻, 电流开始流过  $D_2$  和  $D_3$ , 从  $t_6$  时刻开始,  $L_{r2}$ 、 $C_{r1}$  和  $C_{r2}$  同时进入谐振状态.  $u_{cr2}$  从零开始正向增加,  $u_{cr1}$  从  $-U_d$  开始反向增大. 在  $t_7$  时刻,  $i_{Lr2}$  减小到零时, 流程 8 结束.

流程 9 ( $t_7 \sim t_8$ ): 在  $t_7$  时刻, 负载电流开始通过  $D_2$  和  $D_3$  续流, 辅助谐振电路不工作, 电路处于稳定状态.

流程 10 ( $t_8 \sim t_9$ ): 在  $t_8$  时刻, 开通  $S_{a1}$ ,  $L_{r1}$  限制了  $S_{a1}$  发生开通动作时的电流上升速度, 因此  $S_{a1}$  在开通时处于零电流软开通状态, 同时  $S_2$  和  $S_3$  自然关断. 从  $t_8$  时刻开始,  $L_{r1}$ 、 $C_{r1}$  和  $C_{r2}$  同时进入谐振状态,  $i_{Lr1}$  从零开始正向增大. 在  $t_9$  时刻,  $i_{Lr1}$  正向增大到  $2I_0$ , 流过  $D_2$  和  $D_3$  的电流为零时, 流程 10 结束.

流程 11 ( $t_9 \sim t_{10}$ ): 在  $t_9$  时刻, 负载电流通过  $L_{r1}$ 、 $S_{a1}$ 、 $C_{r1}$  和  $C_{r2}$  所在的支路续流. 该流程中, 流过  $C_{r2}$  的电流恒等于  $I_0$ ,  $L_{r1}$ 、 $C_{r1}$  处于谐振状态,  $i_{Lr2}$  从  $2I_0$  开始正向增大. 在  $t_{10}$  时刻, 当  $u_{cr2}$  变化为零时, 流程 11 结束.

流程 12( $t_{10} \sim t_{11}$ ):从  $t_{10}$  时刻开始,电流流过  $D_{a2}$ ,  $L_{r1}$ 、 $L_{r2}$ 、 $C_{r1}$  和  $C_{r2}$  同时进入谐振状态,  $i_{Lr2}$  从零开始正向增加,  $u_{Cr2}$  从零开始反向增大. 在  $t_{11}$  时刻,  $u_{Cr1}$  和  $u_{Cr2}$  之和等于  $U_d$ ,  $D_1$  和  $D_4$  端电压为零时,流程 12 结束.

流程 13( $t_{11} \sim t_{12}$ ):从  $t_{11}$  时刻开始,电流流过  $D_1$  和  $D_4$ ,  $L_{r1}$ 、 $L_{r2}$ 、 $C_{r1}$  和  $C_{r2}$  同时进入谐振状态. 在  $t_{12}$  时刻,当流过  $D_1$  和  $D_4$  的电流为零时,流程 13 结束.

流程 14( $t_{12} \sim t_{13}$ ):在  $t_{12}$  时刻,开通  $S_1$  和  $S_4$ ,  $S_1$  和  $S_4$  开通前,电流流过  $D_1$  和  $D_4$ ,  $S_1$  和  $S_4$  端电压为零,所以  $S_1$  和  $S_4$  实现了零电压软开通.  $L_{r1}$ 、 $L_{r2}$ 、 $C_{r1}$  和  $C_{r2}$  处于谐振状态. 在  $t_{13}$  时刻,  $i_{Lr1}$  减小到零,流程 14 结束.

流程 15( $t_{13} \sim t_{14}$ ):在  $t_{13}$  时刻,关断  $S_{a1}$ ,因为在关断  $S_{a1}$  前,流过其电流已为零,因此  $S_{a1}$  实现了零电流软关断. 电流开始流过  $D_{a1}$ ,  $L_{r1}$ 、 $L_{r2}$ 、 $C_{r1}$  和  $C_{r2}$  处于谐振状态. 在  $t_{14}$  时刻,当  $i_{Lr2}$  减小到零时,流程 15 结束.

流程 16( $t_{14} \sim t_{15}$ ):从  $t_{14}$  时刻开始,  $L_{r1}$ 、 $C_{r1}$  和  $C_{r2}$  同时进入谐振状态. 在  $t_{15}$  时刻,  $u_{Cr1}$  反向增大到  $U_d$ ,  $u_{Cr2}$  增加到  $2U_d$ ,  $i_{Lr1}$  变化到零,流过  $D_{a1}$  的电流变为零时,流程 16 结束.

### 3 实验验证

样机主电路如图 1 所示,样机参数如下: $P_0 = 3\text{kW}$ ,  $R = 15\Omega$ ,  $L = 1\text{mH}$ ,  $U_d = 400\text{V}$ ,  $L_{r1} = L_{r2} = 8\mu\text{H}$ ,  $C_{r1} = C_{r2} = 33\text{nF}$ ,最大负载电流  $I_{0\text{max}} = 15\text{A}$ ,主开关的开关频率  $f_c = 20\text{kHz}$ ,逆变器输出频率  $f_0 = 50\text{Hz}$ .

图 4(a) 和图 4(b) 分别给出了在满载和轻载时,  $S_1$  动作时的端电压  $u_{S1}$  和流过的电流  $i_{S1}$  的实验波形. 如图 4(a) 和图 4(b) 所示,  $i_{S1}$  从零开始变化值前,  $u_{S1}$  已先变为零,所以  $S_1$  完成了零电压软开通切换;  $u_{S1}$  增大之前,  $i_{S1}$  已经先变为零,所以  $S_1$  完成了零电流软关断切换. 图 4(c) 给出了  $S_{a1}$  动作时的端电压  $u_{S_{a1}}$  和电流  $i_{S_{a1}}$  的实验波形. 如图 4(c) 所示,  $i_{S_{a1}}$  以较低变化率正向增大,所以  $S_{a1}$  完成了零电流软开通切换;  $u_{S_{a1}}$  增大之前,  $i_{S_{a1}}$  已经先变为零,所以  $S_{a1}$  完成了零电流软关断切换. 另外,为证明本文提出的单相全桥软开关逆变器的效率优势,还制作了额定功率为  $3\text{kW}$  的单相全桥硬开关逆变器样机,测得该软开关逆变器在输出功率达到  $3\text{kW}$  时的效率为  $99.1\%$ ,比单相硬开关逆变器高  $3.4\%$ .

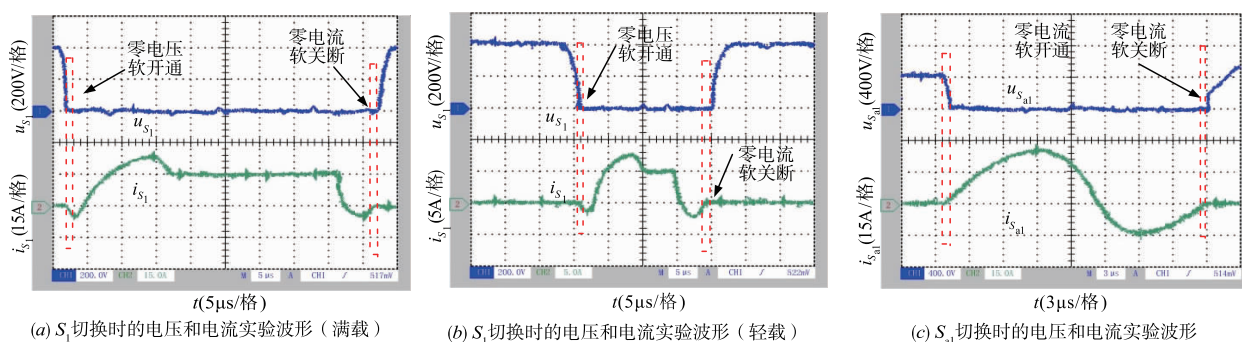


图4 实验波形

### 4 结论

设计出了一种辅助电路与负载并联的新型单相全桥软开关逆变器, MOSFET 和 IGBT 都可作为逆变器的主开关器件,使该逆变器能通用于中小功率领域和大功率领域. 经实验验证得到的结论如下: (1) 在换流过程中,主开关既能完成零电压软开通动作,又能完成零电流软关断动作,而且辅助开关都能完成零电流开关动作; (2) 本文提出的软开关逆变器在额定负载下的效率达到  $99.1\%$ ,高于单相全桥硬开关逆变器.

#### 参考文献

- [1] 王强,岳远韶,王天施,等. 辅助电路与主开关并联的单相全桥节能逆变器[J]. 电子学报, 2019, 47(3): 764-768.  
WANG Qiang, YUE Yuan-shao, WANG Tian-shi, et al. A

single-phase full-bridge energy-saving inverter with auxiliary circuits in parallel with main switches [J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(3): 764-768. (in Chinese)

- [2] 王强,岳远韶,王天施,等. 无源器件辅助换流的单相全桥软开关逆变器[J]. 电子学报, 2018, 46(9): 2295-2298.  
WANG Qiang, YUE Yuan-shao, WANG Tian-shi, et al. Single-phase full-bridge soft-switching inverter with passive device-assisted commutation [J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(9): 2295-2298. (in Chinese)
- [3] Tofoli Fernando Lessa, Gallo Carlos Alberto. Analysis, design, and implementation of soft-switching cells applied to the single-phase full-bridge inverter [J]. IET Power Electronics, 2016, 9(6): 1249-1258.
- [4] 王强,岳远韶,王天施,等. 单相全桥三电平节能逆变器[J]. 电子学报, 2018, 46(12): 3068-3072.  
WANG Qiang, YUE Yuan-shao, WANG Tian-shi, et al. A

single-phase full-bridge three-level energy-saving inverter [J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(12): 3068 – 3072. (in Chinese)

[5] Chien-Ming Wang, Ching-Hung Su, Maoh-Chin Jiang, et

al. A ZVS-PWM single-phase inverter using a simple ZVS-PWM commutation cell [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(2): 758 – 766.

#### 作者简介



王 强 男, 1981 年 10 月出生于辽宁省沈阳市, 博士, 现为辽宁石油化工大学信息与控制工程学院副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为软开关变换器的电路拓扑及控制.

E-mail: master2007@126.com



王有政 男, 1997 年 3 月出生于辽宁省本溪市, 现为辽宁石油化工大学信息与控制工程学院硕士研究生, 主要研究方向为软开关变换器的电路拓扑及控制.

E-mail: 18341314116@163.com