

## 节能型单相全桥零电流开关谐振极逆变器

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:** 为改善以绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)作为开关器件的单相全桥逆变器的效率,提出了一种节能型单相全桥零电流开关谐振极逆变器,在每个桥臂上分别并联1组辅助电路.在工作过程中,主开关和辅助开关都能完成零电流软切换,可消除IGBT拖尾电流造成的关断损耗.分析了电路工作过程,在2kW样机上的实验结果表明开关器件实现了零电流软切换.因此,该拓扑结构可实现以IGBT作为开关器件的单相全桥逆变器的节能运行.

**关键词:** 逆变器;桥臂;辅助谐振电路;零电流关断;拖尾电流;开关损耗

**中图分类号:** TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)02-0412-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.02.027

## Energy-Saving Single-Phase Full-Bridge Zero-Current Switching Resonant Pole Inverter

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 improve the efficiency of single-phase full-bridge inverter with insulated gate bipolar transistor (IGBT) as switching devices, a energy-saving single-phase full-bridge zero-current switching resonant pole inverter is proposed. A set of auxiliary circuit is connected with parallel on each bridge arm. In the working process, both the main switches and the auxiliary switches can achieve zero-current soft-switching, which can eliminate the turn-off loss caused by the tail current of IGBT. The working process of the circuit is analyzed. The experimental results on the 2kW prototype show that the switching devices achieve zero-current soft-switching. Therefore, the topology can realize the energy-saving operation of the single-phase full-bridge inverter with IGBT as the switch devices.

**Key words:** inverter; bridge arm; auxiliary resonant circuit; zero-current turn off; tail current; switching loss

### 1 引言

目前,电力电子装置要求高效率、小体积、低损耗、高功率密度,上述要求促进了电力电子装置向高频化方向发展.逆变器在现代电力电子传动和新能源发电领域应用极为广泛,因此引起了国内外相关学者的高度重视.但逆变器的高频化势必会带来电磁干扰、谐波污染、损耗大、稳定性差等影响.软开关谐振变流技术会有效解决上述问题,使逆变器具有更优的性能指标.

谐振极软开关逆变器在近些年已成为研究热点,相关文献提出了多种单相全桥谐振极逆变器<sup>[1~4]</sup>,但是文献[1~4]中的逆变器主开关在关断时都只能通过限制开关关断瞬间的端电压上升率来实现零电压软关断,当逆变器以IGBT作为开关器件时,IGBT的拖尾电流将会导致关断损耗.

本文提出了一种节能型单相全桥零电流开关谐振极逆变器,相比于相关文献提出的同类型逆变器,具有的优势是逆变器所有开关器件能实现零电流软关断,能消除IGBT拖尾电流导致的关断损耗,有利于逆变器

收稿日期:2019-01-28;修回日期:2019-04-08;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)

以 IGBT 作为开关器件. 本文分析了电路工作状态, 在 2kW 的单相实验样机上验证了该逆变器的工作特性.

## 2 电路工作过程分析

### 2.1 电路结构及控制方式

本文提出的单相全桥零电流开关谐振极逆变器主电路拓扑如图 1 所示. 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  $R$  组成了单相全桥逆变电路; 谐振电容  $C_{r1}$  和  $C_{r2}$ 、谐振电感  $L_{r1}$  和  $L_{r2}$ 、辅助开关  $S_{a1} \sim S_{a4}$  及其反并联二极管  $D_{a1} \sim D_{a4}$  组成了 2 组分别与逆变器桥臂并联的辅助谐振电路 A 和 B. 该逆变器采用受限单极式正弦脉宽调制方法, 负载电流方向为图 1 所示的正方向时,  $S_1$  处于高频切换状态,  $S_2$  和  $S_3$  保持关断状态,  $S_4$  保持开通状态, 辅助电路 A 参与换流过程; 负载电流为负方向时,  $S_2$  处于高频切换状态,  $S_1$  和  $S_4$  保持关断状态,  $S_3$  保持开通状态, 辅助电路 B 参与换流过程. 逆变器所有开关均实现零电流软开通和零电流软关断, 其原理是利用谐振电感来降低开通时流过开关器件的电流变化率, 从而实现主开关和辅助开关的零电流软开通; 在主开关和辅助开关关断前, 利用器件谐振使流过开关的电流变为零, 然后再关断主开关和辅助开关, 从而实现主开关和辅助开关的零电流软关断. 电路分析过程基于以下假设: (1) 电路的器件都工作于理想状态; (2) 负载电流  $I_0$  在 1 个开关周期内保持恒定, 负载相当于恒流源. 各部分电压和电流的正方向如图 1 所示.

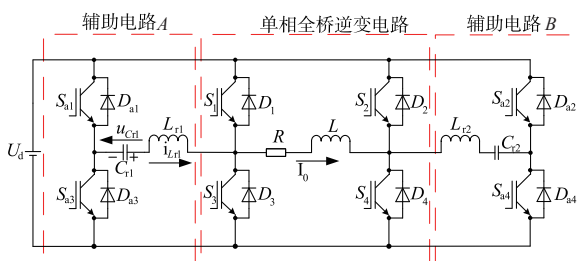


图1 单相全桥零电流开关谐振极逆变器主电路

### 2.2 电路的工作流程

电路在每个开关周期的运行状态分成 11 个工作流程, 图 2 是电路的特征工作波形, 图 3 是各工作流程的等效电路图.

流程 1 ( $t \sim t_0$ ): 电流流过  $S_1$  和  $S_4$ , 流过  $S_1$  和  $S_4$  的电流大小恒等于负载电流  $I_0$ , 此时  $C_{r1}$  的两端电压设定为  $U_a$ , 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  $S_{a1}$ . 从  $t_0$  时刻开始,  $L_{r1}$  和  $C_{r1}$  进入谐振状态,  $L_{r1}$  处于被充电状态,  $C_{r1}$  处于放电状态.  $i_{Lr1}$  从零开始正向增大,  $u_{Cr1}$  从  $U_a$  开始正向减小. 在  $t_1$  时刻,  $u_{Cr1}$  正向减小到  $U_{p1}$ ,  $i_{Lr1}$  正向增大到  $I_0$  时, 流程

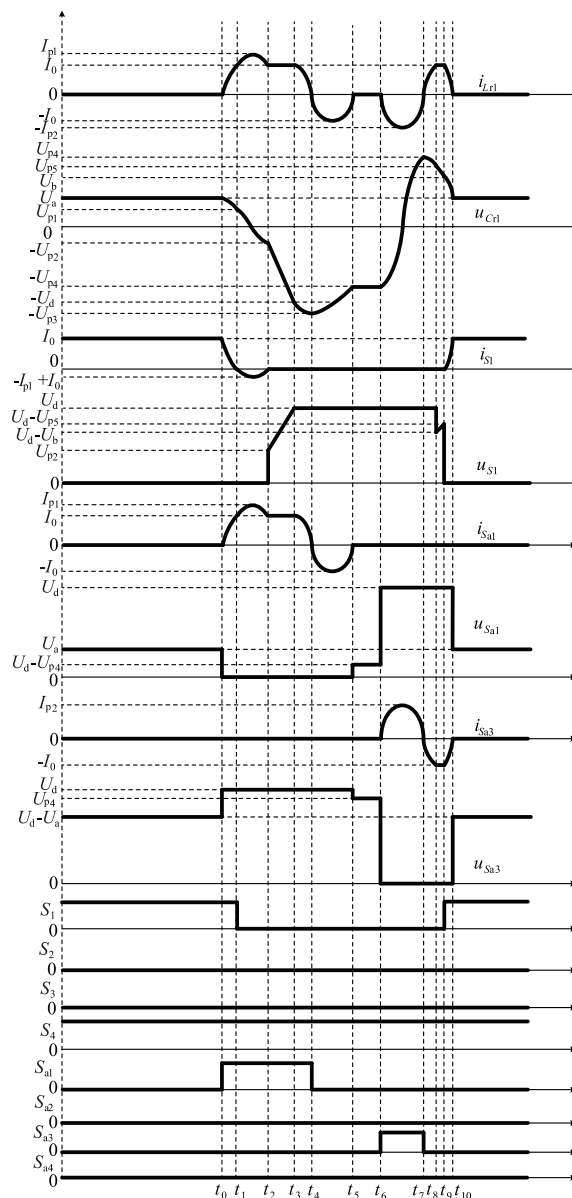


图2 谐振换流期间的理论工作波形

2 终止.

流程 3 ( $t_1 \sim t_2$ ): 在  $t_1$  时刻, 关断  $S_1$ . 本流程开始时, 电流流过  $D_1$ ,  $L_{r1}$  和  $C_{r1}$  处于谐振状态,  $L_{r1}$  处于被充电状态,  $C_{r1}$  处于放电状态,  $i_{Lr1}$  从  $I_0$  开始继续正向增大,  $u_{Cr1}$  从  $U_{p1}$  开始正向减小. 当  $u_{Cr1}$  减小到零时,  $i_{Lr1}$  增加到正向最大值  $I_{p1}$ , 然后  $L_{r1}$  开始处于放电状态,  $C_{r1}$  处于充电状态,  $i_{Lr1}$  从  $I_{p1}$  开始正向减小,  $u_{Cr1}$  从零开始反向增大. 在  $t_2$  时刻,  $i_{Lr1}$  正向减小到  $I_0$ ,  $u_{Cr1}$  反向增大到  $U_{p2}$ ,  $D_1$  截止时, 流程 3 终止.

流程 4 ( $t_2 \sim t_3$ ): 该流程中,  $i_{Lr1}$  始终为  $I_0$ . 在  $t_2$  时刻,  $C_{r1}$  处于被充电状态,  $u_{Cr1}$  从  $-U_{p2}$  开始反向线性增加, 在  $t_3$  时刻, 当  $u_{Cr1}$  反向增大到  $U_d$ ,  $D_3$  端电压为零时, 流程 4 终止.

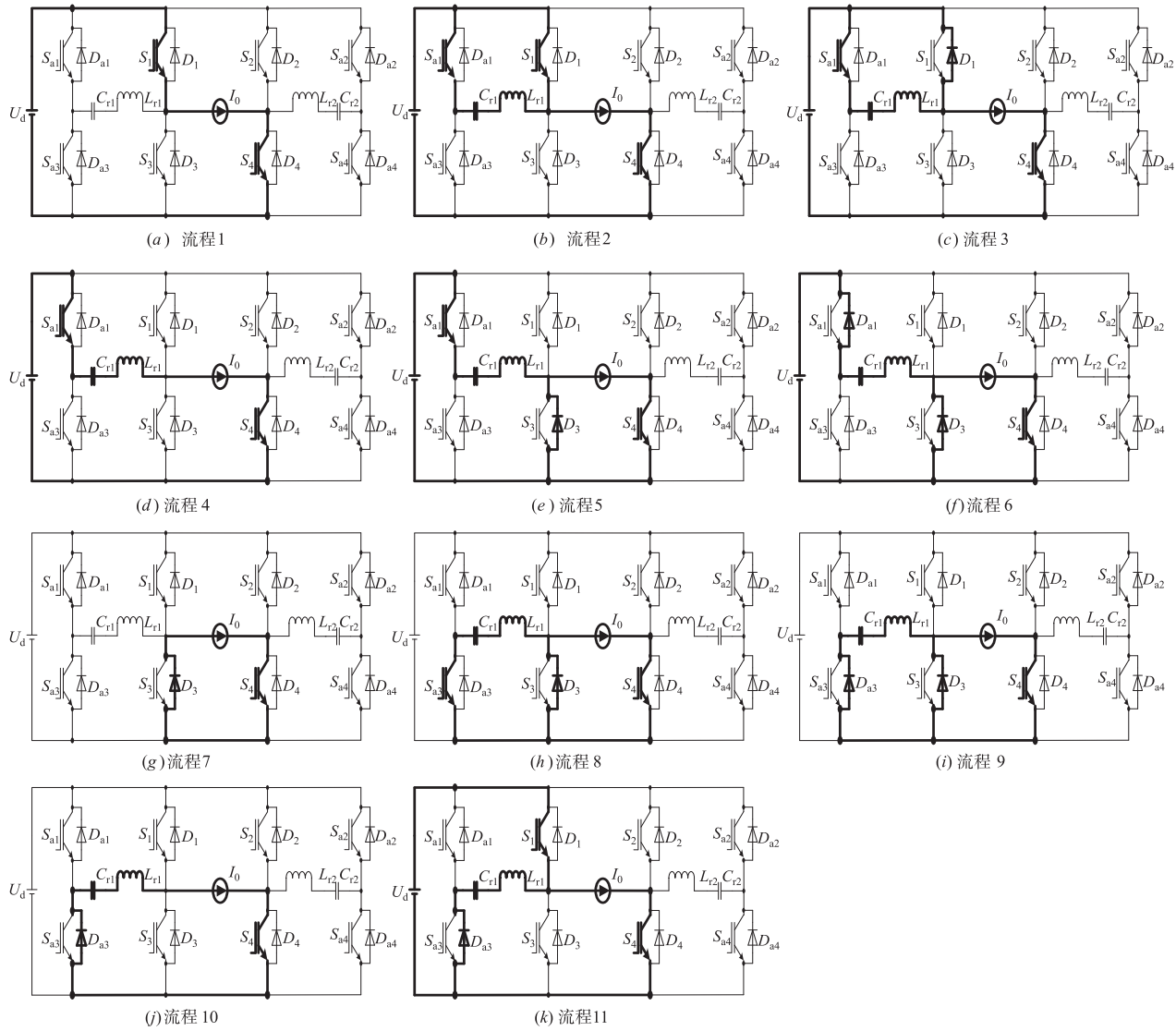


图3 各工作流程的等效电路图

流程5( $t_3 \sim t_4$ ):从 $t_3$ 时刻开始,电流开始流过 $D_3$ ,  $L_{r1}$ 和 $C_{r1}$ 处于谐振状态, $L_{r1}$ 处于放电状态, $C_{r1}$ 处于被充电状态, $i_{Lr1}$ 从 $I_0$ 开始正向减小, $u_{Cr1}$ 从 $-U_d$ 开始反向增大,流过 $D_3$ 的电流从零开始逐渐增大.在 $t_4$ 时刻,当 $i_{Lr1}$ 减小到零, $u_{Cr1}$ 增加到反向最大值 $U_{p3}$ 时,流程5终止.

流程6( $t_4 \sim t_5$ ):在 $t_4$ 时刻,关断 $S_{a1}$ ,电流开始流过 $D_{a1}$ , $L_{r1}$ 和 $C_{r1}$ 继续处于谐振状态, $L_{r1}$ 处于被充电状态, $C_{r1}$ 处于放电状态. $i_{Lr1}$ 从零开始反向增大, $u_{Cr1}$ 从 $-U_{p3}$ 开始反向减小.当 $u_{Cr1}$ 反向减小到 $-U_d$ 时, $i_{Lr1}$ 达到本流程反向最大值 $I_0$ .然后 $L_{r1}$ 处于放电状态, $i_{Lr1}$ 从 $-I_0$ 开始反向减小.在 $t_5$ 时刻,当 $i_{Lr1}$ 减小到零, $u_{Cr1}$ 反向减小到 $U_{p4}$ , $D_{a1}$ 截止时,流程6终止.

流程7( $t_5 \sim t_6$ ):在 $t_5$ 时刻,负载电流开始通过 $D_3$ 续流, $u_{Cr1}$ 始终为 $-U_{p4}$ ,辅助谐振电路不工作,电路处于稳定状态.

流程8( $t_6 \sim t_7$ ):在 $t_6$ 时刻,开通 $S_{a3}$ .从 $t_6$ 时刻开始, $L_{r1}$ 和 $C_{r1}$ 进入谐振状态, $L_{r1}$ 处于被充电状态, $C_{r1}$ 处于放电状态. $i_{Lr1}$ 从零开始反向增大, $u_{Cr1}$ 从 $-U_{p4}$ 开始反向减小,当 $u_{Cr1}$ 减小到零时, $i_{Lr1}$ 达到反向最大值 $I_{p2}$ .然后 $L_{r1}$ 处于放电状态, $C_{r1}$ 处于充电状态, $i_{Lr1}$ 从 $I_{p2}$ 开始反向减小, $u_{Cr1}$ 从零开始正向增大.在 $t_7$ 时刻, $u_{Cr1}$ 正向增加到 $U_{p4}$ , $i_{Lr1}$ 反向减小到零时,流程8终止.

流程9( $t_7 \sim t_8$ ):在 $t_7$ 时刻,关断 $S_{a3}$ .电流开始流过 $D_{a3}$ , $L_{r1}$ 和 $C_{r1}$ 继续处于谐振状态, $L_{r1}$ 处于被充电状态, $C_{r1}$ 处于放电状态. $i_{Lr1}$ 从零开始正向增大, $u_{Cr1}$ 从 $U_{p4}$ 开始正向减小,同时流过 $D_3$ 的电流逐渐减小.在 $t_8$ 时刻,当 $i_{Lr1}$ 增大到 $I_0$ , $u_{Cr1}$ 正向减小到 $U_{p5}$ , $D_3$ 截止时,流程9终止.

流程10( $t_8 \sim t_9$ ):在 $t_8$ 时刻,负载电流经 $S_4$ 、 $D_{a3}$ 、 $C_{r1}$ 和 $L_{r1}$ 进行续流.该流程中, $i_{Lr1}$ 始终等于 $I_0$ , $u_{Cr1}$ 处于放电

状态,  $u_{Cr1}$  从  $U_{p5}$  开始正向线性减小. 当  $u_{Cr1}$  减小到设定值  $U_b$  时, 流程 10 终止.

流程 11 ( $t_9 \sim t_{10}$ ): 在  $t_9$  时刻, 开通  $S_1$ . 从  $t_9$  时刻开始,  $L_{r1}$  和  $C_{r1}$  进入谐振状态,  $L_{r1}$  处于放电状态,  $C_{r1}$  处于放电状态.  $i_{Lr1}$  从  $I_0$  开始正向减小,  $u_{Cr1}$  从设定值  $U_b$  开始正向减小. 在  $t_{10}$  时刻,  $u_{Cr1}$  正向减小到  $U_a$ ,  $i_{Lr1}$  正向减小到零时, 流程 11 终止.

### 3 实验验证

根据图 1 制作了实验样机, 参数如下: 额定输出功率  $P_0 = 2\text{kW}$ , 负载电阻  $R = 10\Omega$ , 负载电感  $L = 1\text{mH}$ , 直流电源电压  $U_d = 300\text{V}$ , 最大负载电流  $I_{0\max} = 20\text{A}$ , 开关频率  $f_c = 20\text{kHz}$ , 输出频率  $f_0 = 50\text{Hz}$ , 谐振电感  $L_{r1} =$

$8\mu\text{H}$ , 谐振电容  $C_{r1} = 0.33\mu\text{F}$ .

图 4(a) 和图 4(b) 分别是在满载和轻载时, 主开关  $S_1$  发生切换时的端电压  $u_{S1}$  和流过的电流  $i_{S1}$  的实验波形. 图 4(a) 和图 4(b) 呈现出流过  $S_1$  的电流的上升速度被抑制, 所以轻载和满载时都实现了  $S_1$  的零电流软开通; 图 4(a) 和图 4(b) 还呈现出  $u_{S1}$  增大之前,  $i_{S1}$  已经等于零, 所以轻载和满载时都实现了  $S_1$  的零电流软关断. 图 4(c) 和图 4(d) 分别是辅助开关  $S_{a1}$  和  $S_{a3}$  发生切换时的端电压  $u_{Sa1}$ ,  $u_{Sa3}$  和电流  $i_{Sa1}$ ,  $i_{Sa3}$  的实验波形. 图 4(c) 和图 4(d) 呈现出  $S_{a1}$  和  $S_{a3}$  开通时,  $i_{Sa1}$  和  $i_{Sa3}$  以较低变化率正向增大, 实现了  $S_{a1}$  和  $S_{a3}$  零电流软开通; 图 4(c) 和图 4(d) 还呈现出  $u_{Sa1}$  和  $u_{Sa3}$  增大之前,  $i_{Sa1}$  和  $i_{Sa3}$  已经等于零, 所以实现了  $S_{a1}$  和  $S_{a3}$  的零电流软关断.

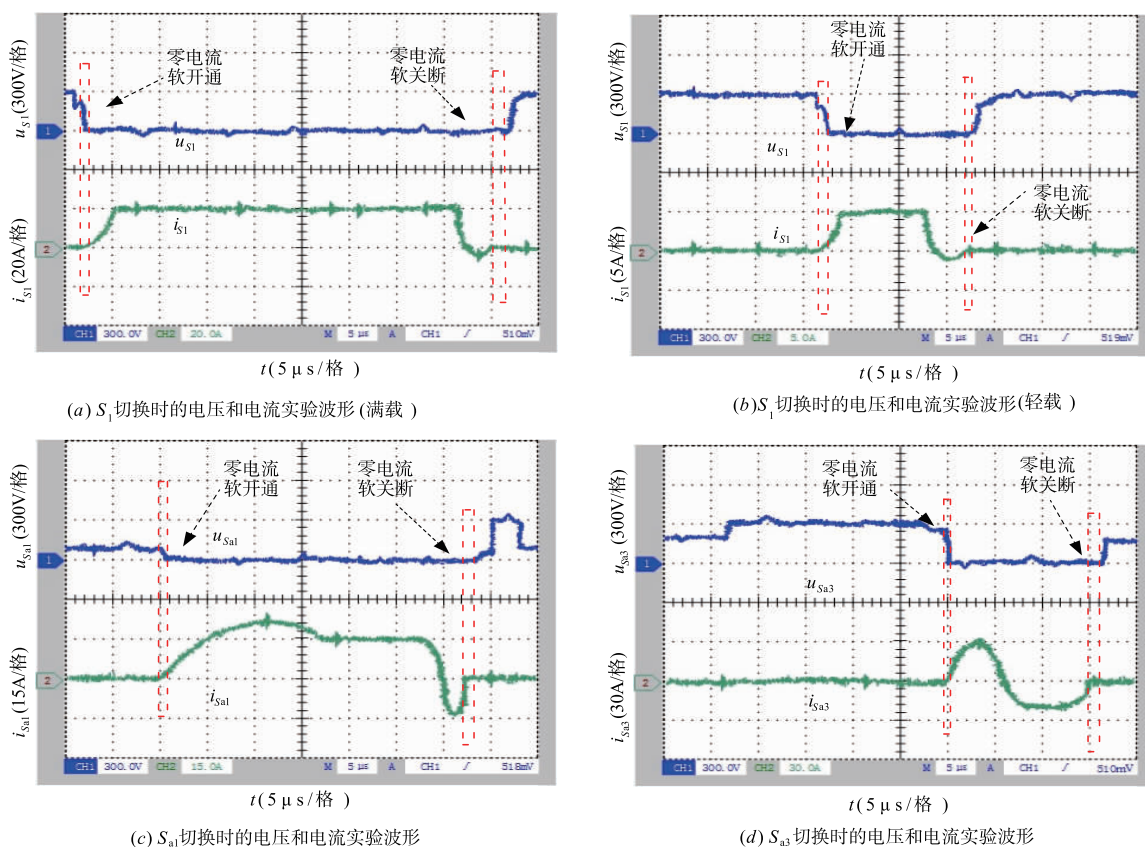


图4 实验波形

### 4 结论

设计出了一种节能型单相全桥零电流开关谐振极逆变器, 经实验验证得到结论: 在换流过程中, 主开关和辅助开关都能完成零电流软切换, 该逆变器更适合以 IGBT 作为开关器件.

#### 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 Yuanshao, Wang Tianshi, 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 Yuanshao, Wang Tianshi, 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] 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 Yuanshao, Wang Tianshi, et al. A single-phase full-bridge three-level energy-saving inverter[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(12): 3068 – 3072. (in Chinese)
- [4] 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

# 电子学报

2020 年第 2 期 Acta Electronica Sinica No. 2 2020  
(总第 444 期) (Monthly) (Series No. 444)

主管单位 中国科学技术协会  
主办单位 中国电子学会  
主 编 郝 跃  
全职副主编 诸 叶 梅  
编 辑 《电子学报》编辑委员会  
通信地址 北京 165 信箱  
(邮政编码 100036)  
电 话 (010) 68600728, 68600730  
主 页 <http://www.ejournal.org.cn>  
电子邮箱 [new@ejournal.org.cn](mailto:new@ejournal.org.cn)  
印 刷 北京博海升彩色印刷有限公司

国内总发行 北京市报刊发行局  
国外总发行 中国国际图书贸易总公司  
国内订购处 全国各邮电局  
中邮阅读网 <http://www.183read.com>

China Association for Science and Technology  
Published by the Chinese Institute of Electronics  
Chief Editor: HAO Yue  
Full-time Vice Chief Editor: ZHU Ye-mei  
Edited by Editorial Board of Acta Electronica Sinica  
Add: Editorial Office of Acta Electronica Sinica,  
P. O. Box 165, Beijing 100036, China  
Tel: 86-10-68600728, 68600730  
Printed by Beijing BOHS Colour Printing Co. Ltd., Beijing,  
China Distributed by  
Domestic: Beijing Baokan Faxingju, China  
Foreign: China International Book Trading Corporation  
Subscription Office—All Local Post Offices in China