

高效率单相全桥软开关整流器

王 强^{1,2}, 陈 俊^{1,2}, 王天施^{1,2}, 刘晓琴^{1,2}

(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: 单相全桥整流器工作在硬开关状态时,随着开关频率和输出功率的增大,开关损耗会显著增大,影响整流器效率的提高.为解决这一问题,提出了一种单相全桥软开关整流器,在整流器处于死区状态时,将要开通的主开关并联的谐振电容的电压能减小至零,主开关动作时能完成零电压软切换,双向辅助开关动作时能完成零电流软切换.分析了整流器的换流过程,实验结果表明主开关和辅助开关完成了软切换动作.因此,该单相全桥软开关整流器在高开关频率下能实现高效率运行.

关键词: 整流器; 开关损耗; 双向开关; 零电压开关; 零电流开关

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)06-1244-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.06.028

High-Efficiency Single-Phase Full-Bridge Soft-Switching Rectifier

WANG Qiang^{1,2}, CHEN Jun^{1,2}, WANG Tian-shi^{1,2}, LIU Xiao-qin^{1,2}

(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: When single-phase full-bridge rectifier works in the hard-switching state, with the increasing of switching frequency and output power, the switching loss will increase significantly, which has negative influence on the efficiency of the rectifier. In order to solve this problem, a single-phase full-bridge soft-switching rectifier is proposed. When the rectifier is in the dead state, the voltage across the resonant capacitor in parallel with the main switch can decrease to zero via the resonance of the auxiliary circuit. The main switch can achieve zero-voltage switching, and the bidirectional auxiliary switch can achieve zero-current switching. The commutation process of the rectifier is analyzed. The experimental results show that the main switch and auxiliary switch can achieve soft-switching. Therefore, the single-phase full-bridge soft-switching rectifier can achieve high-efficiency operation with high switching frequency.

Key words: rectifier; switching loss; bidirectional switch; zero-voltage switching; zero-current switching

1 引言

单相全桥整流器可应用到了光伏发电系统、电动汽车车载充电器系统和高速列车牵引系统,能提高电能的利用率,有效的抑制谐波分量和无功功率对电网造成的严重“污染”.此外,其还在通信领域、电力系统无功补偿、有源滤波、超导储能以及潮流控制等相关领域有十分广阔的应用前景^[1].因此,研发高性能单相全桥软开关整流器具有重要的应用价值.

本文提出了一种节能型单相全桥软开关整流器,其实现软切换的原理是当整流器处于死区状态时,在

不影响整流器正常功率传输的情况下,在主开关开通之前,辅助电路发生谐振,使主开关并联的谐振电容电压先下降到零,主开关可实现零电压软开通,同时因为每个主开关都并联了谐振电容,所以主开关在关断时可完成零电压软关断.文中分析了电路的工作流程,最后在额定功率为4.9kW的实验样机上验证了该单相全桥软开关整流器的性能.

2 电路结构和工作流程分析

2.1 电路结构

该整流器主电路如图1所示,桥式整流器是由主开

收稿日期:2018-11-26;修回日期:2019-06-10;责任编辑:梅志强

基金项目:国家自然科学基金(No. 51207069);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)

关 $S_1 \sim S_4$ 以及其两端反并联的续流二极管 $D_1 \sim D_4$ 组成;在交流电源输入侧串接输入升压电感 L , 直流输出侧并联电容 C_1 和 C_2 ; 辅助谐振开关 S_{a1} 和 S_{a2} 及其反并联的续流二极管 D_{a1} 和 D_{a2} 、谐振电感 L_r 与主开关两端并联的谐振电容 $C_{r1} \sim C_{r4}$ 构成辅助谐振电路. 为简化分析, 做如下假设: (1) 电路中所有元器件都工作在理想状态^[2-4]; (2) 在一个开关周期内, 整流器输入侧的升压电感很大, 整流器输入侧的电流 I_s 可视为恒流源, 直流侧分压电容 C_1 和 C_2 足够大, 而且在实际应用中 C_1 和 C_2 分别并联了大阻值低功率的均压电阻 R_1 和 R_2 , 在稳态时, 可实现 C_1 和 C_2 的电压 U_{C_1} 和 U_{C_2} 约等于 $U_{dc}/2$. 图 2 等效电路中所标注的方向为物理量参考正方向. 理论工作波形如图 3 所示. 各个流程等效电路如图 4 所示.

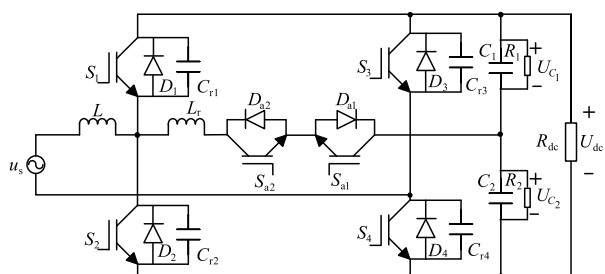


图1 节能型单相全桥软开关整流器主电路

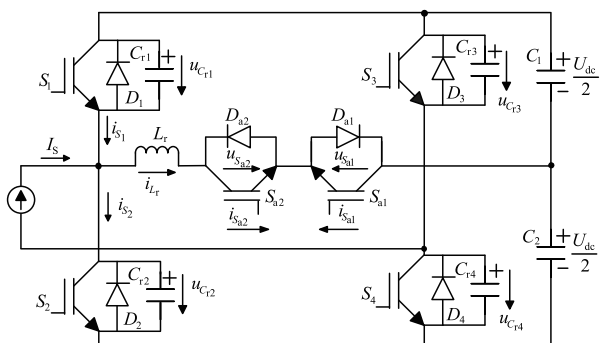


图2 节能型单相全桥软开关整流器等效电路

2.2 电路的工作流程

流程 1 ($t \sim t_0$): 电路的初始状态, S_1 和 S_4 处于开通状态, S_2 和 S_3 处于关断状态, 辅助电路不工作, 整流器输出电压为 U_{dc} , 电路处于稳态.

流程 2 ($t_0 \sim t_1$): 在 t_0 时刻, 开通 S_{a2} , 因其与 L_r 串接, 故在发生开通动作时, 流过 S_{a2} 的电流的变化受到限制, S_{a2} 实现了零电流软开通. 从 t_0 时刻开始, L_r 承受电压等于 $U_{dc}/2$, L_r 处于被正向充电状态, i_{L_r} 从零开始正向线性增大, 同时流过 D_1 的电流 i_{D_1} 从 I_s 逐渐线性减小, 当 i_{L_r} 增大到 I_s 的时候, i_{D_1} 减小到零, D_1 自然关断, 然后 i_{L_r} 继续正向线性增大, 同时电流开始流过 S_1 . 在 t_1 时刻, i_{L_r} 增大到阈值 I_1 , i_{S_1} 增大到 $I_1 - I_s$ 时, 流程 2 结束.

流程 3 ($t_1 \sim t_2$): 在 t_1 时刻, 关断 S_1 , 在电容 C_{r1} 的作用

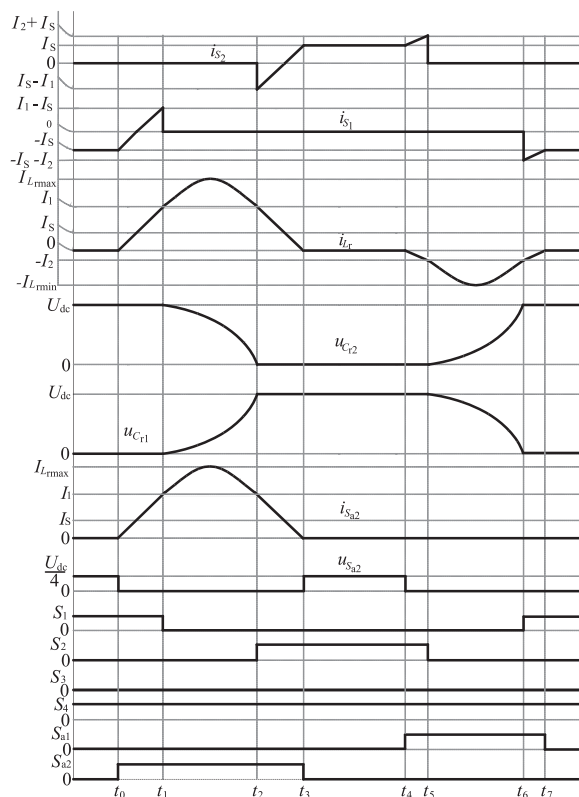


图3 谐振换流期间的理论工作波形

下, 使 S_1 在关断时刻的端电压从零开始以较小的变化率缓慢增加, 所以 S_1 在关断时处于零电压软关断状态. 在 S_1 完成切换动作之后, C_{r1} 、 C_{r2} 与 L_r 进入谐振状态, C_{r2} 反向放电, L_r 和 C_{r1} 被正向充电, $u_{C_{r2}}$ 从 U_{dc} 开始正向减小, i_{L_r} 从 I_1 开始继续正向增大, $u_{C_{r1}}$ 从零开始正向增大. 当 $u_{C_{r1}}$ 和 $u_{C_{r2}}$ 都变化到 $U_{dc}/2$ 时, i_{L_r} 增大到最大值 $I_{L_{rmax}}$, 然后 L_r 开始正向放电, i_{L_r} 从 $I_{L_{rmax}}$ 开始正向减小. 在 t_2 时刻, i_{L_r} 减小到 I_1 , $u_{C_{r1}}$ 增加到 U_{dc} , $u_{C_{r2}}$ 减小到零时, 流程 3 结束.

流程 4 ($t_2 \sim t_3$): 在 t_2 时刻, 开通 S_2 , 因其与并联的电容电压值已经为零, 故主开关 S_2 在开通时实现了零电压软开通. 在 t_2 时刻之后, 电流流过 D_2 , 谐振电感 L_r 两端承受反压, i_{L_r} 和 i_{D_2} 开始线性减小, 当 i_{L_r} 从 I_1 减小到 I_s 时, i_{D_2} 减小到零. 然后 i_{L_r} 继续以相同的电流变化率线性减小, i_{S_2} 以相同的电流速率从零增大. 直到 t_3 时刻, i_{L_r} 减小为零, i_{S_2} 增大到 I_s , 流程 4 结束.

流程 5 ($t_3 \sim t_4$): 流程 5 ($t_3 \sim t_4$): 在 t_3 时刻, 关断 S_{a2} , 因为此时流过 S_{a2} 的电流已经下降为零, 故 S_{a2} 在关断时处于零电流软关断状态. 在该流程中, 电流 I_s 通过 S_2 和 D_4 续流, 电路处于稳定状态, 辅助电路不工作.

流程 6 ($t_4 \sim t_5$): 在 t_4 时刻, 开通 S_{a1} , 因其与 L_r 串联, 故在发生开通动作时, 流过 S_{a1} 的电流受到限制, S_{a1} 实现零电流软开通. S_{a1} 开通后, L_r 被反向充电, i_{L_r} 开始从零开

始反向线性增大, i_{S_2} 从 I_S 开始正向线性增加. 在 t_5 时刻, i_{L_r}

反向增大到阈值 I_2 , i_{S_2} 正向增大到 $I_S + I_2$ 时, 流程 6 结束.

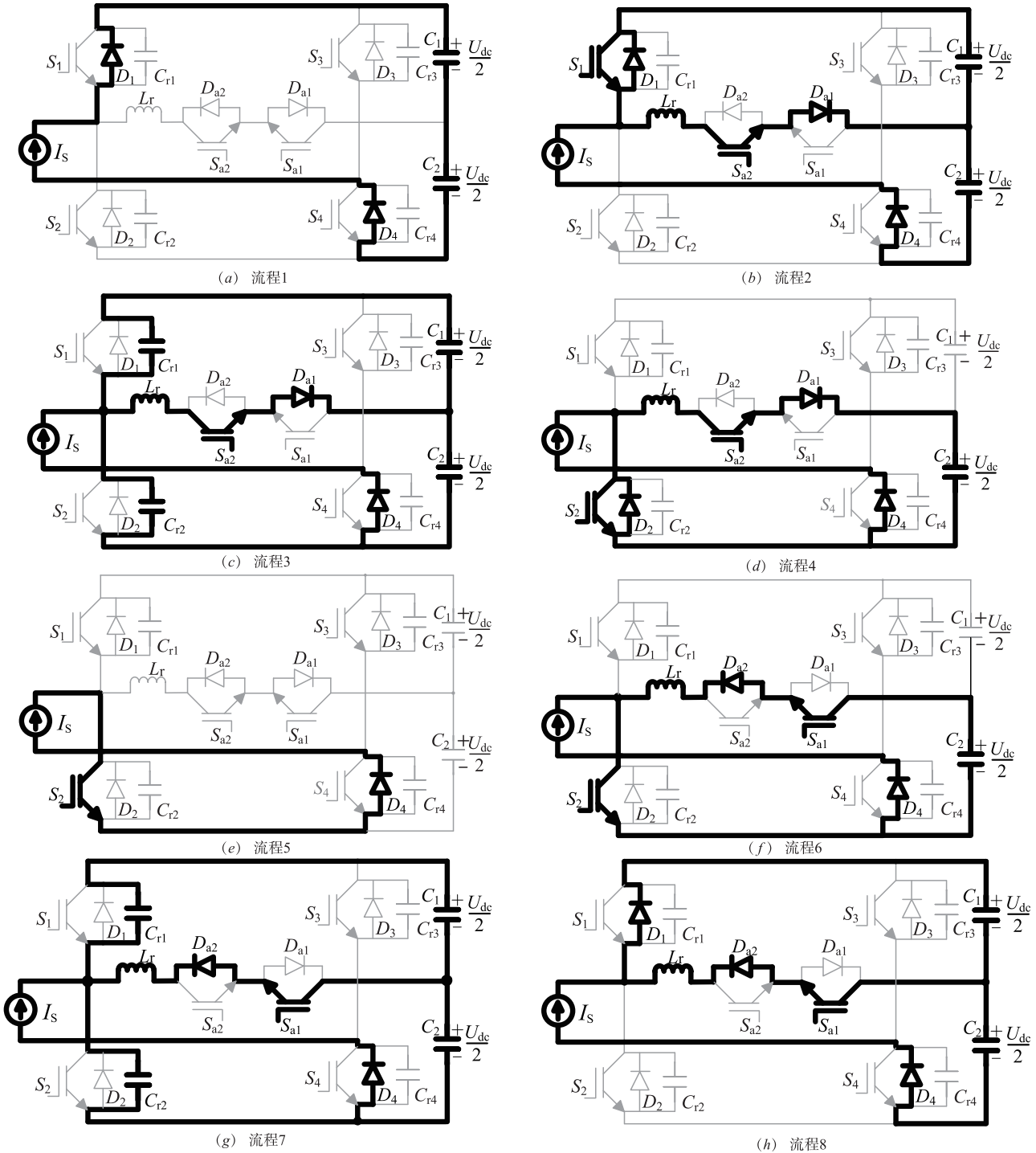


图4 各工作流程的等效电路图

流程 7 ($t_5 \sim t_6$): 在 t_5 时刻, 关断 S_2 , 在 C_{r2} 作用下, 使 S_2 在关断时刻的端电压从零开始以较小的变化率缓慢增加, 所以 S_2 在关断时处于零电压软关断状态. 在 S_2 完成切换动作之后, C_{r1} 、 C_{r2} 和 L_r 进入谐振状态, C_{r1} 反向放电, L_r 被反向充电, C_{r2} 被正向充电, $u_{C_{r1}}$ 从 U_{dc} 开始正向减小, $u_{C_{r2}}$ 从零开始正向增加, i_{L_r} 从 I_2 开始继续反向增大. 当 $u_{C_{r1}}$ 和 $u_{C_{r2}}$ 都变

化到 $U_{dc}/2$ 时, i_{L_r} 反向增大到最大值 $I_{L_{min}}$, 然后 L_r 进入反向放电状态, i_{L_r} 从 $I_{L_{min}}$ 开始反向减小. 在 t_6 时刻, $u_{C_{r1}}$ 减小到零, $u_{C_{r2}}$ 增加到 U_{dc} , i_{L_r} 反向减小到 I_2 时, 流程 7 结束.

流程 8 ($t_6 \sim t_7$): 在 t_6 时刻, 开通 S_1 , 因为 u_{S1} 在 t_6 时刻已经变化到零, 故主开关 S_1 实现了零电压软开通. 在 t_6 时刻之后, 电流流过 D_1 , 谐振电感 L_r 两端承受正向电

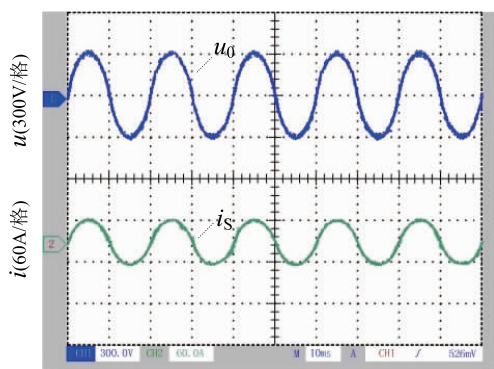
压,其值恒为 $U_{dc}/2$, 并且 i_{L_r} 的大小从 I_2 开始反向线性减小. 在 t_7 时刻, 当 i_{L_r} 反向减小到零时, 流程 8 结束. 然后电路返回到流程 1, 开始下一个开关周期的工作.

3 实验验证

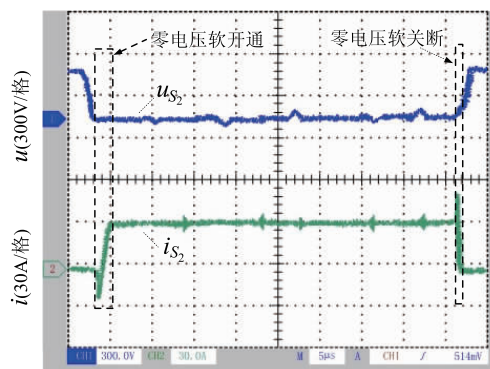
样机参数如下: 额定输出功率 $P_0 = 4.9\text{kW}$, 整流器交流侧的输入电压有效值 $U_0 = 220\text{V}$, 输入升电感 $L = 2.5\text{mH}$, 负载电阻 $R_{dc} = 25\Omega$, 整流器交流侧输入电流有效值 $I_s = 23\text{A}$, 最大输入电流 $I_{S_{max}} = 33\text{A}$, 直流侧输出额定电压 $U_{dc} = 350\text{V}$, 开关频率 $f_c = 20\text{kHz}$, 死区时间 $\Delta = 2\mu\text{s}$, 功率因素 $\lambda = 0.98$, 谐振电感电流阈值分别为 $I_1 = 53\text{A}$, $I_2 = 20\text{A}$, S_{a1} 、 S_{a2} 触发脉冲占空比分别为 $\rho_{S_{a1}} = 0.05$, $\rho_{S_{a2}} = 0.088$, $L_r = 5\mu\text{H}$, $C_{r1} = C_{r2} = C_{r3} = C_{r4} = 56\text{nF}$.

相关的实验波形如图 5 所示. 图 5(a) 给出了在输

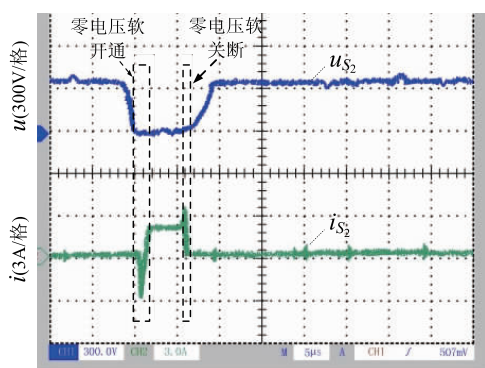
入频率为 50Hz 时, 整流器交流侧输入电压 u_0 和输入电流 i_s 的实验波形, 可以看出 u_0 和 i_s 基本同相位. 图 5(b) 和图 5(c) 分别在满载和轻载时, 主开关 S_2 进行切换动作时的端电压 u_{S_2} 和流过的电流 i_{S_2} 的实验波形, 从图 5(b) 和图 5(c) 可以看出 S_2 关断时, u_{S_2} 以较低的变化率正向增大, 轻载和满载时都实现了 S_2 的零电压软关断; 从图 5(b) 和图 5(c) 还可以看出在 S_2 的电流变化之前, u_{S_2} 已降为零, 故分别在轻载和满载两种情况下都实现了 S_2 的零电压软开通. 图 5(d) 给出了在切换开关动作时辅助开关器件 S_{a2} 的端电压 $u_{S_{a2}}$ 和流过该器件的电流 $i_{S_{a2}}$ 的实验波形, 从中可以看出 S_{a2} 在开通时, $i_{S_{a2}}$ 以较低的变化率正向增大, S_{a2} 实现了零电流软开通; 在图 5(d) 中还可以看出 $u_{S_{a2}}$ 在增大前, 流过 S_{a2} 的电流已经变化到零, S_{a2} 实现了零电流软关断.



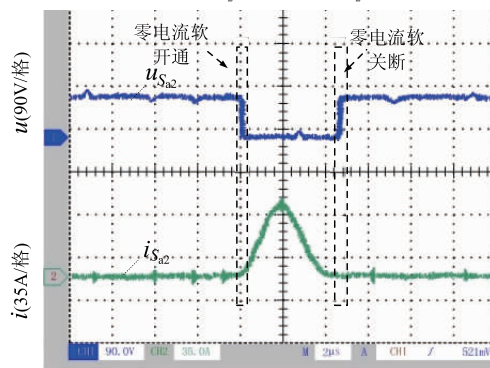
(a) 整流器输入电压 u_0 和输入电流 i_s 的实验波形图



(b) S_2 切换时的端电压 u_{S_2} 和流过的电流 i_{S_2} 的实验波形 (满载)



(c) S_2 切换时的端电压 u_{S_2} 和流过的电流 i_{S_2} 的实验波形 (轻载)



(d) S_{a2} 切换时的端电压 $u_{S_{a2}}$ 和流过的电流 $i_{S_{a2}}$ 的实验波形

图5 实验结果

4 结论

本文设计了一种新型单相全桥软开关整流器, 经实验验证可得如下结论: (1) 在整流器处于轻载和满载时, 主开关在切换过程中能完成零电压开关; (2) 在辅助电路参与换流时, 辅助开关在切换过程中能完成零电流开关; (3) 整流器输入交流电压和交流电流波形为

光滑正弦波, 且相位基本保持同步, 所以该整流器具有较高的功率因数, 而且增设的辅助电路对整流器的功率因数无影响. 对于研发具有高开关频率和高效率的单相全桥整流器, 本文研究工作具有重要参考价值.

参考文献

- [1] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制 [M]. 北京: 机械工

- 业出版社, 2013. 85 – 90.
Zhang Xing, Zhang Chongwei. PWM Rectifier and Its Control[M]. Beijing: China Machine Press, 2013. 85 – 90. (in Chinese)
- [2] 王强, 岳远韶, 王天施, 等. 电流型零电压开关节能整流器[J]. 电子学报, 2018, 46(6): 1515 – 1518.
Wang Qiang, Yue Yuanshao, Wang Tianshi, et al. Current-source zero-voltage switching energy-saving rectifier[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(6): 1515 – 1518. (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] 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)

作者简介



王 强 (通讯作者) 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



陈 俊 男, 1994 年 3 月出生于浙江省金华市, 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: 18358006251@163.com

电子学报

2020 年第 6 期 Acta Electronica Sinica No. 6 2020

(总第 448 期) (Monthly) (Series No. 448)

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 1 6 5 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
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