

新型单相软开关 AC-DC-AC 变换器

王 强^{1,2}, 李 兵^{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: 为改善单相 AC-DC-AC 变换器的性能, 提出了一种单相谐振直流环节零电压开关 AC-DC-AC 功率变换器拓扑结构, 由图腾柱式单相整流器, 位于直流环节的辅助谐振电路和单相全桥逆变器组成. 利用同一组辅助电路能分别将整流器输出端电压和逆变器输入端电压变化到零, 使整流器和逆变器桥臂上的开关器件分别实现零电压切换. 分析了电路的工作流程, 在 1.2kW 样机上的实验结果表明开关器件完成了软切换. 该拓扑结构对于研发节能型单相 AC-DC-AC 变换器具有借鉴意义.

关键词: 整流器; 逆变器; 零电压开关; 变压器; 谐振

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)03-0616-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.03.026

Novel Single-Phase Soft-Switching AC-DC-AC Converter

WANG Qiang^{1,2}, LI Bing^{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: In order to improve the performance of the single-phase AC-DC-AC converter, a single-phase resonant DC link zero-voltage switching AC-DC-AC power converter topology is proposed. It is composed of a totem-pole type single phase rectifier, an auxiliary resonant circuit in the DC link and a single-phase full bridge inverter. The output voltage of the rectifier and the input voltage of the inverter can be changed to zero respectively via the same auxiliary circuit and the switching devices on the arm of the rectifier and inverter can achieve zero-voltage switching respectively. This paper analyzes the working process of the circuit. The experimental results on the 1.2kW prototype show that the switching devices achieved soft switching. The topological structure has reference significance for the development of energy-saving single-phase AC-DC-AC converters.

Key words: rectifier; inverter; zero-voltage switching; transformer; resonance

1 引言

软开关 AC-DC-AC 变换器是在传统硬开关变换器的基础上增设辅助谐振电路, 为主开关提供软切换条件. 根据辅助谐振电路的位置, 可以分为谐振极软开关 AC-DC-AC 变换器和谐振直流环节软开关 AC-DC-AC 变换器. 其中, 谐振直流环节软开关 AC-DC-AC 变换器的辅助谐振电路位于变换器的中间直流侧, 其结构简单, 而且辅助电路器件相对较少, 因此, 研究谐振直流环节软开关 AC-DC-AC 功率变换器中间直流侧的辅助电路拓扑结构具有重要意义.

相关文献已提出多种可以应用到 AC-DC-AC 功率变换器中间直流侧的辅助谐振电路结构, 但是仍然需

要进一步改进. 例如文献[1, 2]提出的辅助电路结构设置了至少 2 个辅助开关, 当检测到流过谐振电感的电流达到设定值时, 才能利用辅助开关触发谐振, 使辅助电路控制复杂化; 文献[3]采取了给变换器的整流部分和逆变部分分别设置独立的辅助谐振电路, 不利于降低辅助谐振电路的硬件成本. 此外, 以上文献提出的辅助电路在变换器直流环节电压上升和下降过程中都要处于谐振状态, 这不利于降低辅助电路损耗.

为弥补上述缺陷, 提出了一种单相谐振直流环节零电压开关 AC-DC-AC 功率变换器拓扑结构, 其具有以下特点: (1) 直流侧的辅助电路只含有 1 个位于直流母线并联支路上的辅助开关, 这降低了辅助电路硬件成本, 同时使辅助电路控制简单化; (2) 在变换器直流环节只设置了

收稿日期: 2018-05-30; 修回日期: 2018-11-15; 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)

一组辅助谐振电路,利用这组辅助电路能分别使整流器输出端和逆变器输入端的电压变化到零,使主开关器件都能完成零电压软切换,而且辅助开关能完成零电流软切换;(3)辅助电路只在整流器输出端电压下降到零(逆变器输入端电压上升到稳态电压)的过程中才处于谐振状态,有利于降低辅助电路损耗.文中详细分析了电路工作流程,最后在额定功率为 1.2kW 的实验样机上验证了该 AC-DC-AC 功率变换器的性能.

2 电路工作状态分析

2.1 电路结构

变换器主电路如图 1 所示,主电路可分为 3 部分.第 1 部分包括由主开关 $S_3 \sim S_6$ 及其反并联二极管 $D_3 \sim D_6$ 组成的单相全桥逆变器,由输出滤波电感 L_r 和输出滤波电容 C_r 组成的滤波器及逆变器的负载电阻 R_L ;第 2 部分包括由带有反并联二极管的主开关 S_1 和 S_2 ,二极管 D_1 和 D_2 组成的单相图腾柱式整流电路^[4];第 3 部分包括由辅助开关 S_a ,辅助二极管 D_{a1} 、 D_{a2} ,电容 C_b ,谐振电感 L_r ,谐振电容 C_r 以及变压器 T_r 组成的辅助谐振电路.为简化分析,作以下假设:(1)各器件都是理想器件;(2) L_{in} 电感值足够大,在 1 个开关周期内流过 L_{in} 的电流 I_{in} 保持恒定;(3) L_r 电感值足够大,在 1 个开关周期内逆变器输出端电流 I_0 保持恒定,逆变器输出端可看作与恒流源相连;(4) C_b 电容值足够大,在一个开关周期内 U_{C_b} 保持恒定.图 1 所示的拓扑结构可等效为图 2 所示电路.各部分电压和电流的正方向已在图 2 中标出.

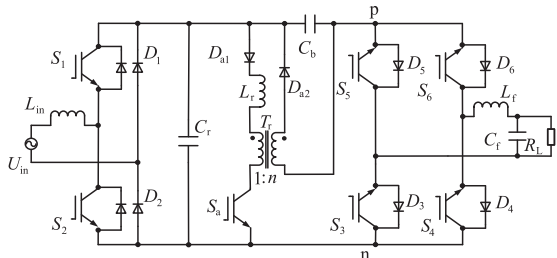


图1 单相谐振直流环节零电压开关 AC-DC-AC 变换器主电路

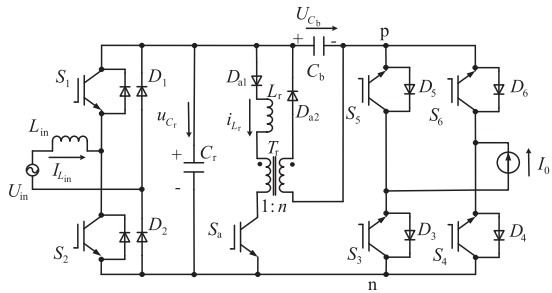


图2 逆变器的等效电路

2.2 电路的工作状态

一个主开关的开关周期包含 12 个电路状态,电路

特征波形如图 3 所示,图 4 为各流程等效电路图.

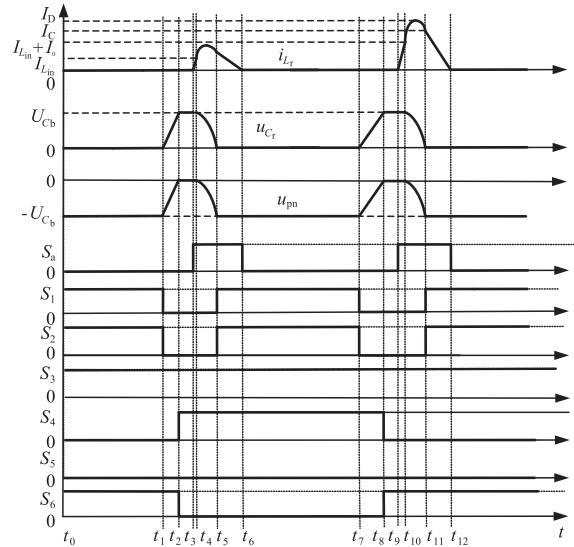


图3 谐振换流期间的理论工作波形

流程 1 ($t_0 \sim t_1$): S_1, S_2, S_3 和 S_6 处于导通状态,整流器输入端的电流 I_{in} 通过 S_2 和 D_2 续流,电容 C_b 通过 S_1 和 S_2 向逆变器供电,此时 C_b 等效为逆变器的直流电源,电路处于稳态,辅助谐振电路不工作.

流程 2 ($t_1 \sim t_2$): 在 t_1 时刻,同时关断 S_1 和 S_2 ,关断 S_1 之后, I_{in} 开始流过 S_1 的反并联二极管,导致在 S_1 被关断后,其两端电压仍然为零,所以 S_1 的关断损耗为零; C_r 限制了 S_2 发生关断动作时的端电压上升速度,所以 S_2 在关断时处于零电压软关断状态.从 t_1 时刻开始,流过 C_r 的电流等于 $I_{in} + I_0$, C_r 处于充电状态, C_r 的端电压 u_{C_r} 线性增大.当 u_{C_r} 线性增大到 U_{C_b} 时,逆变器输入端电压 u_{in} 线性变化到零,本流程结束.

流程 3 ($t_2 \sim t_3$): 在 t_2 时刻,关断 S_6 ,同时开通 S_4 .因为此时 u_{in} 等于零,所以 S_6 和 S_4 是在零电压条件下完成切换.在本流程中,整流端输入端的电流 I_{in} 通过 S_1 的反并联二极管以及 D_6, D_4 和 D_2 实现续流,负载电流 I_0 通过 D_4 和 S_3 实现续流,电路工作在稳态.

流程 4 ($t_3 \sim t_4$): 在 t_3 时刻,开通 S_a .因为 L_r 限制了 S_a 发生开通动作时的电流上升速度,所以 S_a 在开通时实现了零电流软开通.在该流程中,施加在 L_r 上的电压等于 $(1 - 1/n)U_{C_b}$, L_r 处于充电状态, i_{L_r} 开始线性增加.当 i_{L_r} 增大到 I_{L_r} 时, D_6 自然关断,本流程结束.

流程 5 ($t_4 \sim t_5$): 在 t_4 时刻, L_r 与 C_r 开始进入谐振状态, L_r 被充电, i_{L_r} 处于增大阶段; C_r 处于放电过程, u_{C_r} 处于减小阶段.当 u_{C_r} 变化到 U_{C_b}/n 时, i_{L_r} 达到正向峰值 I_A .然后 L_r 和 C_r 都处于放电状态, i_{L_r} 和 u_{C_r} 都逐渐减小.当 u_{C_r} 减小到零, i_{L_r} 减小到 I_B 时,本流程结束.

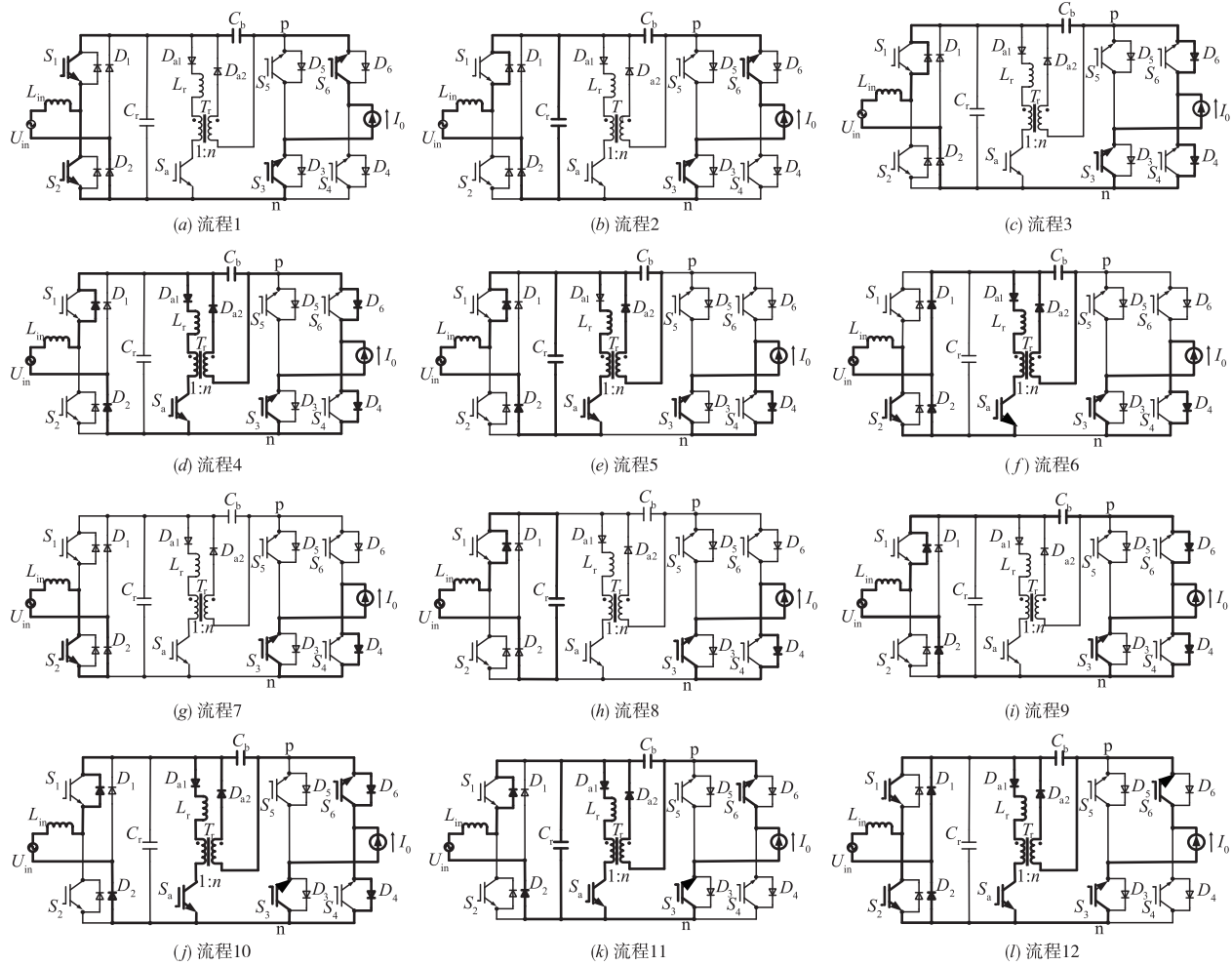


图4 各工作状态的等效电路图

流程6($t_5 \sim t_6$):在 t_5 时刻,开通 S_1 和 S_2 ,因为此时 u_{C_r} 等于零, S_1 和 S_2 两端的电压为零,所以 S_1 和 S_2 实现了零电压开通.从 t_5 时刻开始, L_r 中储存的电能通过变压器 T_r 向电容 C_b 转移, L_r 承受的电压值为 U_{C_b}/n , i_{L_r} 线性减小.在 t_6 时刻,当 i_{L_r} 减小到零时,关断 S_a ,则 S_a 实现了零电流软关断,本流程结束.

流程7($t_6 \sim t_7$):在该流程中,辅助谐振电路停止工作,整流器输入端的电流 $I_{L_{in}}$ 通过 S_2 和 D_2 续流,负载电流 I_0 通过 D_4 和 S_3 实现续流,电路工作在稳态.

流程8($t_7 \sim t_8$):在 t_7 时刻,同时关断 S_1 和 S_2 ,关断 S_1 之后, $I_{L_{in}}$ 开始流过 S_1 的反并联二极管,导致在 S_1 被关断后,其两端电压仍然为零,所以 S_1 的关断损耗为零; C_r 限制了 S_2 发生关断动作时的端电压上升速度,所以 S_2 在关断时处于零电压软关断状态.在 S_1 和 S_2 完成关断动作之后,流过 C_r 的电流等于 $I_{L_{in}}$, C_r 处于充电状态,因为流过 L_{in} 的电流 $I_{L_{in}}$ 恒定,所以 C_r 的端电压 u_{C_r} 线性增大.当 u_{C_r} 线性增大到 U_{C_b} 时,逆变器输入端电压 u_{pm} 线

性变化到零,本流程结束.

流程9($t_8 \sim t_9$):在 t_8 时刻,开通 S_6 ,同时关断 S_4 .因为此时 u_{pm} 等于零,所以 S_6 和 S_4 是在零电压条件下完成切换.在本流程中,整流端输入端的电流 $I_{L_{in}}$ 通过 S_1 的反并联二极管以及 D_6 , D_4 和 D_2 实现续流,负载电流 I_0 通过 D_4 和 S_3 实现续流,电路工作在稳态.

流程10($t_9 \sim t_{10}$):在 t_9 时刻,开通 S_a ,因 L_r 限制了 S_a 发生开通动作时的电流上升速度,所以 S_a 在开通时实现了零电流软开通.在该流程中,施加在 L_r 上的电压等于 $(1-1/n)U_{C_b}$, L_r 处于充电状态, i_{L_r} 开始线性增加.当 i_{L_r} 增大到 $I_{L_{in}}$ 时, D_6 关断,随着 i_{L_r} 继续增大,电流开始流过 S_6 .当 i_{L_r} 增大到 $I_{L_{in}}+I_0$ 时,本流程结束.

流程11($t_{10} \sim t_{11}$):在 t_{10} 时刻, L_r 与 C_r 开始进入谐振状态, L_r 处于被充电的过程, i_{L_r} 处于持续增大阶段, C_r 处于放电过程, u_{C_r} 处于减小阶段.当 u_{C_r} 变化到 U_{C_b}/n 时, i_{L_r} 达到正向峰值 I_0 .然后 L_r 和 C_r 都处于放电状态, i_{L_r} 和 u_{C_r} 都逐渐减小.当 u_{C_r} 减小到零, i_{L_r} 减小到 I_C 时,本流程结束.

流程 12 ($t_{11} \sim t_{12}$): 在 t_{11} 时刻, 开通 S_1 和 S_2 , 因为此时 u_{c_r} 等于零, S_1 和 S_2 两端的电压为零, 所以 S_1 和 S_2 实现了零电压开通. 从 t_{11} 时刻开始, 整流器输入端电流 I_{L_m} 通过 S_2 和 D_2 续流, 逆变器输出电流 I_0 通过 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_6 续流, i_{L_r} 通过 D_1 和 D_2 续流, 同时 L_r 中储存的电能通过变压器 T_r 向电容 C_b 转移, L_r 承受的电压值为 U_{C_b}/n , i_{L_r} 线性减小. 在 t_{12} 时刻, 当 i_{L_r} 减小到零时, 关断 S_a , 则 S_a 实现了零电流软关断, 本流程结束.

根据以上各工作流程分析可知, 在流程 4 至流程 6 期间和流程 10 至流程 12 期间, 电路利用变压器可以向电容 C_b 补充电能, 从而使 C_b 的端电压 U_{C_b} 恒定.

至此, 电路在 1 个逆变器主开关的开关周期内的工作流程分析完毕. 然后电路重新返回流程 1, 进入下一个开关周期的工作.

3 实验结果

样机参数如下: 额定输出功率 $P_0 = 1.2\text{kW}$, 交流电源电压有效值 $U_m = 220\text{V}$, 逆变器输出端的滤波电感 $L_r = 2\text{mH}$, 逆变器输出端的滤波电容 $C_r = 4.7\mu\text{F}$, 直流母线上的电容 $C_b = 470\mu\text{F}$, 整流器输入端电感 $L_m = 30\text{mH}$, 谐振电感 $L_r = 10\mu\text{H}$, 谐振电容 $C_r = 56\text{nF}$, S_a 的触发脉冲占空比 $\rho_{S_a} = 0.16$, 变压器变比 $n = 3$, 额定负载电

阻 $R_l = 10\Omega$, 逆变器主开关的开关频率 $f_c = 10\text{kHz}$, 变换器输出频率 $f_0 = 50\text{Hz}$, 最大负载电流为 $I_{0\text{max}} = 15\text{A}$, 逆变器输出线电压有效值 $U_0 = 110\text{V}$, 电容 C_b 两端电压 $U_{C_b} = 180\text{V}$, 整流器输入端的电流 $I_{L_m} = 5.5\text{A}$.

相关的实验波形如图 5 所示, 实验波形中的电压和电流取的正方向与图 2 中的标注一致. 图 5(a) 和图 5(b) 分别给出了在满载和轻载下, 逆变器桥臂上的主开关 S_6 进行切换动作时的端电压 u_{S_6} 和流过的电流 i_{S_6} 的实验波形, 图 5(a) 和图 5(b) 显示 S_6 进行关断动作时 u_{S_6} 始终等于零, 所以 S_6 完成了零电压软关断; 在 i_{S_6} 开始反向增大之前, u_{S_6} 已经降低至零, 所以 S_6 完成了零电压软开通. 图 5(c) 给出了辅助开关 S_a 进行切换动作时的端电压 u_{S_a} 和流过的电流 i_{S_a} 的实验波形, 图 5(c) 显示 S_a 开通时, i_{S_a} 以较低的变化率增大, 实现了 S_a 的零电流软开通; 还可以看出 u_{S_a} 增大之前, i_{S_a} 已经等于零, 实现了 S_a 的零电压关断. 图 5(d) 给出了整流器主开关 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, 可以看出在 i_{S_2} 增大之前, u_{S_2} 已经变化到零, 完成了 S_2 的零电压软开通切换; S_2 关断时, u_{S_2} 的变化率较低, 完成了 S_2 的零电压软关断切换.

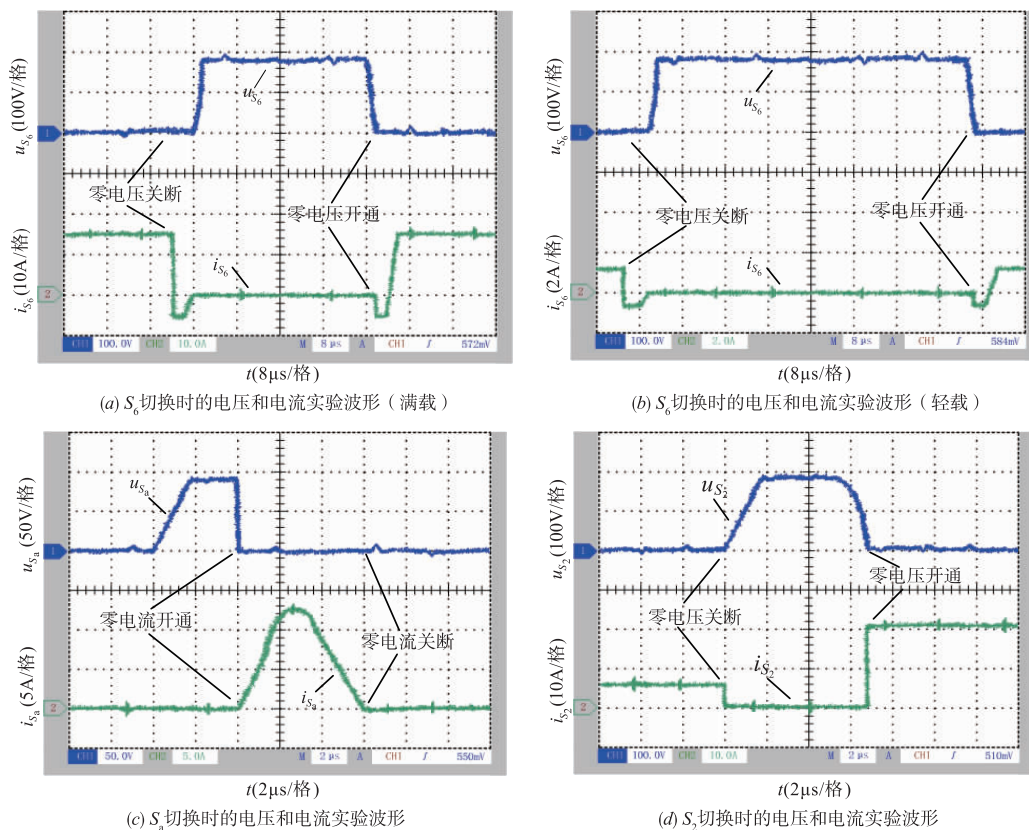


图5 实验波形

4 结论

设计出了一种单相谐振直流环节零电压开关 AC-DC-AC 功率变换器,其显著特点是该变换器的直流侧只有一组辅助电路,且辅助电路结构简单,通过关断整流器桥臂上的主开关来触发逆变器输入端的电压向零变化,使逆变器主开关能完成零电压切换,而且该变化过程中,辅助电路不处于谐振状态,能减小辅助电路损耗;通过开通辅助电路中的辅助开关来触发整流器输出端电压向零变化,为整流器主开关的零电压切换提供条件.经实验验证得到的结论如下:在轻载和满载时,逆变器主开关实现了零电压开关,此外,整流器桥臂上的主开关和辅助电路中的辅助开关也可以分别实现零电压开关和零电流开关.本文的研究成果对于单相谐振直流环节零电压开关 AC-DC-AC 变换器的推广和应用具有重要意义.

参考文献

- [1] 王强,邢岩.具有并联谐振直流环节的软开关电压源逆变器[J].电子学报,2013,41(11):2317-2320.

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

- Wang Qiang, Xing Yan. Soft switching voltage source inverter with parallel resonant DC link[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(11): 2317-2320. (in Chinese)
- [2] 王强,刘岩松,陈祥雪,等.基于单独储能电容辅助换流的并联谐振直流环节逆变器[J].电子学报,2015,43(10):2133-2136.
- Wang Qiang, Liu Yansong, Chen Xiangxue, et al. Parallel resonant DC link inverter with a single storage capacitor-assisted commutation[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(10): 2133-2136. (in Chinese)
- [3] 陈国呈,孙承波,屈克庆,等.一种ZVT双PWM变换器的拓扑与实验研究[J].电工技术学报,2006,21(3):36-41.
- Chen Guocheng, Sun Chengbo, Qu Keqing, et al. A ZVT double PWM Converter topology and its experimental research[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(3): 36-41. (in Chinese)
- [4] Wang Chien-Ming, Tao Chin-wang, Lai Yu-hao. Analysis, design, and implementation of a high-performance rectifier [J]. Journal of Power Electronics, 2016, 16(3): 905-914.



李 兵 男,1994年7月出生
于辽宁省大连市,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:651698243@qq.com