

# 新型单相全桥谐振直流环节逆变器

王 强<sup>1,2</sup>, 李 兵<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:** 为改善单相全桥逆变器的性能, 提出了一种新型单相全桥谐振直流环节逆变器. 位于直流环节的辅助电路能提升直流母线电压稳态值, 减少直流母线电压的零状态对直流电压利用率的负面影响. 文中分析了逆变器的换流过程. 实验结果表明开关器件完成了软切换, 逆变器性能得到了改善.

**关键词:** 逆变器; 辅助电路; 软开关; 升压; 直流电压利用率

**中图分类号:** TM464      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2020)12-2493-04

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.12.027

## Novel Single-Phase Full-Bridge Inverter with a Resonant DC Link

WANG Qiang<sup>1,2</sup>, LI Bing<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 performance of single-phase full-bridge inverter, a novel single-phase full-bridge inverter with a resonant DC link is proposed. The auxiliary circuit in the DC link can improve the steady state value of the DC bus voltage, and reduce the negative effect of DC bus zero-voltage state on DC voltage utilization. In this paper, the commutation process of the inverter is analyzed. The experimental results show that the switching devices achieve soft switching, and the performance of the inverter is improved.

**Key words:** inverter; auxiliary circuit; soft-switching; boost; DC voltage utilization

## 1 引言

单相全桥逆变器应用广泛, 为改善单相全桥逆变器的性能, 研究人员已提出了多种可设置在单相全桥逆变器直流环节的辅助电路拓扑结构, 但是仍然需要改善, 例如文献[1]提出的辅助电路中存在中性点电位变化问题, 使逆变器不稳定; 文献[2]提出的辅助电路中含有变压器, 剩磁通累积会使变压器铁芯饱和; 文献[3, 4]提出的辅助电路需要增加计时与测量模块, 使辅助电路控制复杂化. 此外, 文献[1~4]提出的谐振直流环节逆变器的共同缺陷是直流环节电压周期性形成的零状态会降低逆变器的直流电压利用率.

本文提出了一种新型单相全桥谐振直流环节软开关逆变器, 其显著优势是直流环节的辅助电路能增大逆变器的直流母线稳态电压和逆变器输出电

压的基波幅值, 使逆变器的直流电压利用率得到改善.

## 2 电路工作过程分析

### 2.1 电路结构

如图1所示, 主电路包含单相全桥逆变电路, 升压电路和辅助谐振电路. 单相全桥逆变电路包括主开关  $S_1 \sim S_4$  及其反并联二极管  $D_1 \sim D_4$ , 输出滤波电感  $L_f$  和输出滤波电容  $C_f$  及逆变器的负载电阻  $R_L$ ; 升压电路包括电感  $L_b$  和电容  $C_b$ ; 辅助谐振电路包括辅助开关  $S_a$ , 辅助二极管  $D_a$ , 谐振电感  $L_r$ , 谐振电容  $C_r$  和辅助开关  $S_b$  及其反并联二极管  $D_b$ . 图2为图1的等效电路. 在图2中标出了各部分电压和电流的正方向.

### 2.2 电路的工作过程

电路在每个开关周期的工作过程包含6个工作流程, 图3为电路在一个开关周期内的特征波形, 图4为

收稿日期: 2018-09-24; 修回日期: 2019-02-11; 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)

各工作流程的等效电路图。

(1) 流程1( $t_0 \sim t_1$ ): 直流电源  $U_{in}$  向  $L_b$  释放能量,  $L_b$  被充电, 同时  $U_{in}$  向逆变器负载端释放能量, 电路处于稳态. 在该流程中,  $S_a$  和  $D_a$  承受的电压数值之和等于  $U_{in}$ , 而且  $S_a$  的发射极电位高于集电极, 但是在图2中已设定  $S_a$  的端电压  $u_{s_a}$  的正方向是由集电极指向发射极, 所以  $u_{s_a}$  在该流程中小于零.

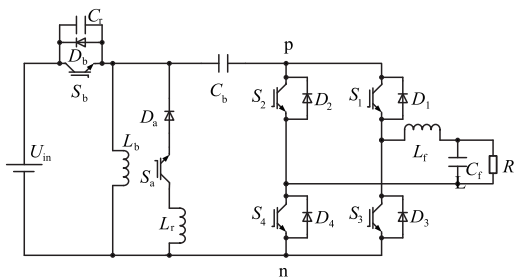


图1 单相全桥谐振直流环节逆变器主电路

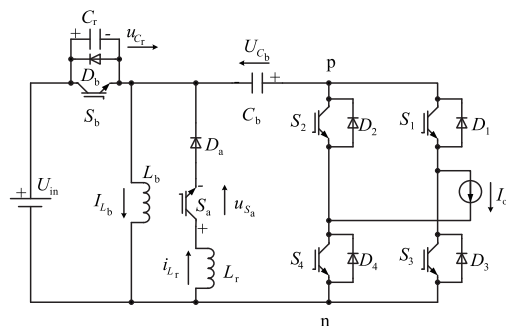


图2 逆变器的等效电路

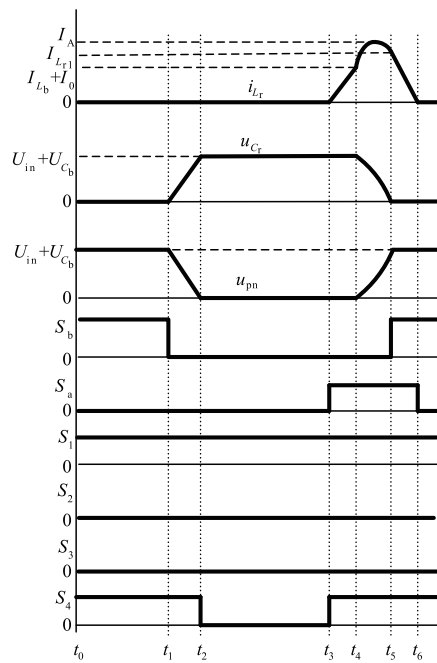


图3 谐振换流期间的理论工作波形

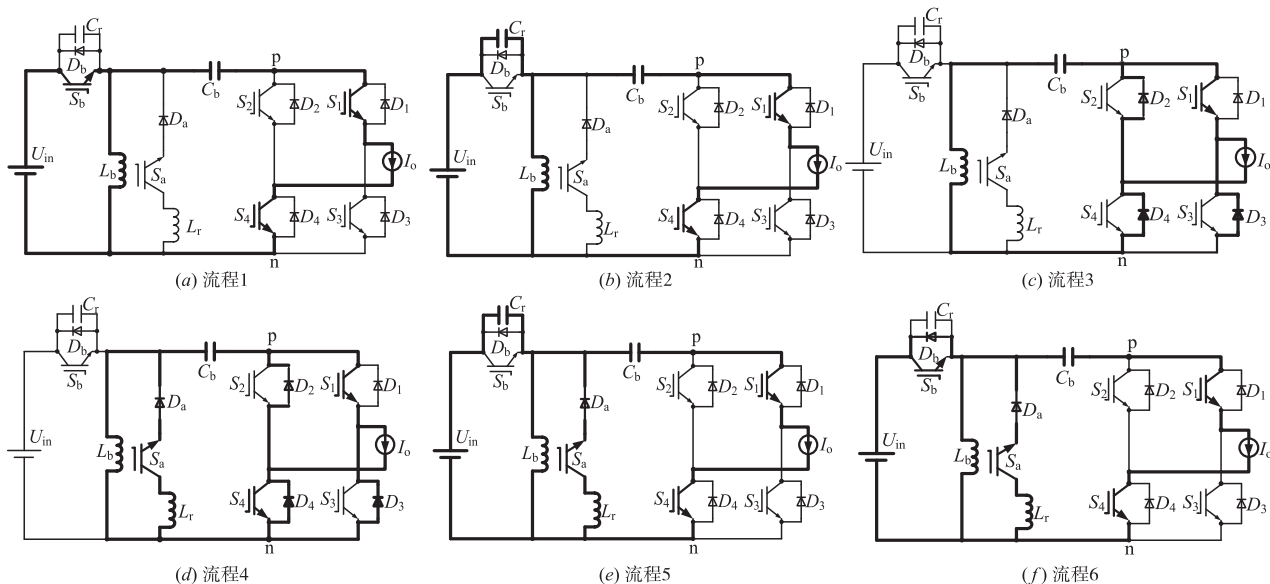


图4 各工作流程的等效电路图

(3) 流程3( $t_2 \sim t_3$ ): 在  $t_2$  时刻,  $S_4$  的触发脉冲变为低电平, 因为  $S_4$  关断后的两端电压仍然等于零, 所以  $S_4$

(2) 流程2( $t_1 \sim t_2$ ): 在  $t_1$  时刻,  $S_b$  的触发脉冲变为低电平, 因为  $C_r$  抑制了  $S_b$  关断时的端电压上升速率, 所以  $S_b$  做到了零电压软关断动作. 在该流程中, 直流电源通过  $C_r$  向  $L_b$  和逆变器负载端释放能量. 因为在每个开关周期, 流过  $L_b$  的电流  $I_{L_b}$  和逆变器输出端电流  $I_o$  可看作恒定, 流过  $C_r$  的电流等于  $I_{L_b} + I_o$ , 所以  $C_r$  的端电压  $u_{c_r}$  线性变化. 当  $u_{c_r}$  变化到  $U_{in} + U_{C_b}$  时, 本流程结束.

的关断损耗为零. 在本流程中,  $I_o$  通过桥臂上的续流二极管来完成续流, 同时  $L_b$  通过桥臂上的续流二极管向

$C_b$  转移能量, 电路处于稳态.

(4) 流程 4 ( $t_3 \sim t_4$ ): 在  $t_3$  时刻,  $S_4$  和  $S_a$  的触发脉冲都变成高电平.  $S_4$  开通前的两端电压为零,  $S_4$  做到了零电压开通;  $L_r$  抑制了  $S_a$  开通时的电流变化速率,  $S_a$  在开通时做到了零电流软开通. 在该流程中,  $L_r$  承受的电压等于  $U_{C_b}$ ,  $i_{L_r}$  线性增加. 当  $i_{L_r}$  变化到  $I_{L_b} + I_o$  时, 桥臂上的续流二极管自然截止, 本流程结束.

(5) 流程 5 ( $t_4 \sim t_5$ ):  $L_r$  与  $C_r$  处于谐振状态,  $L_r$  被充电,  $C_r$  放电,  $i_{L_r}$  增大,  $u_{C_r}$  减小. 当  $u_{C_r}$  变化到  $U_{in}$  时,  $i_{L_r}$  变化到正向峰值  $I_A$ . 然后  $L_r$  和  $C_r$  都放电,  $i_{L_r}$  和  $u_{C_r}$  都减小. 当  $u_{C_r}$  变化到零,  $i_{L_r}$  变化到  $I_{L_{r1}}$  时, 本流程结束.

(6) 流程 6 ( $t_5 \sim t_6$ ): 在  $t_5$  时刻,  $S_b$  的触发脉冲变为高电平. 在  $t_5$  时刻,  $u_{C_r}$  等于零, 因此  $S_b$  做到了零电压开通. 在该流程中,  $L_r$  两端电压等于  $U_{in}$ ,  $L_r$  放电,  $i_{L_r}$  线性减小. 当  $i_{L_r}$  从  $I_{L_{r1}}$  变化到  $I_{L_b} + I_o$  时,  $D_b$  自然截止, 然后电流流过  $S_b$ , 当  $i_{L_r}$  变化到零时, 本流程结束. 然后电路重返流程 1, 开始下一个开关周期的工作.

### 3 实验结果

实验参数如下: 额定输出功率  $P_o = 2\text{kW}$ , 直流电源电压  $U_{in} = 110\text{V}$ , 升压电感  $L_b = 25\text{mH}$ , 升压电容  $C_b =$

$470\mu\text{F}$ , 额定负载电阻  $R_L = 10\Omega$ , 开关频率  $f_c = 20\text{kHz}$ , 输出频率  $f_o = 50\text{Hz}$ , 谐振电感  $L_r = 6.5\mu\text{H}$ , 谐振电容  $C_r = 90\text{nF}$ , 输出滤波电感  $L_f = 1\text{mH}$ , 输出滤波电容  $C_f = 3.9\mu\text{F}$ .

实验波形如图 5 所示, 实验波形中的电压和电流的正方向与图 2 标注的方向相同. 图 5(a) 为辅助开关  $S_a$  发生切换时的端电压  $u_{S_a}$  和流过的电流  $i_{S_a}$  的实验波形, 如图 5(a) 所示, 电流开始流过  $S_a$  时,  $i_{S_a}$  以较低的速率增大,  $S_a$  做到了零电流软开通;  $u_{S_a}$  从零开始变化之前,  $i_{S_a}$  已经先变化到零,  $S_a$  做到了零电流软关断. 另外, 在图 5(a) 中,  $i_{S_a}$  减小到零之后,  $u_{S_a}$  变化为负值, 其原因已在 2.2 节流程 1 中作出解释. 图 5(b) 为辅助开关  $S_b$  发生切换时的端电压  $u_{S_b}$  和流过的电流  $i_{S_b}$  的实验波形, 如图 5(b) 所示,  $i_{S_b}$  反向增大之前,  $u_{S_b}$  已经变化到零,  $S_b$  做到了零电压软开通;  $S_b$  关断时,  $i_{S_b}$  瞬间减小到零,  $u_{S_b}$  以较低的速率增大,  $S_b$  做到了零电压软关断. 图 5(c) 和图 5(d) 分别为逆变器处于满载和轻载条件下, 主开关  $S_4$  发生切换时的端电压  $u_{S_4}$  和流过的电流  $i_{S_4}$  的实验波形, 如图 5(c) 和图 5(d) 所示,  $S_4$  发生切换时  $u_{S_4}$  保持为零, 所以  $S_4$  做到了零电压软切换.

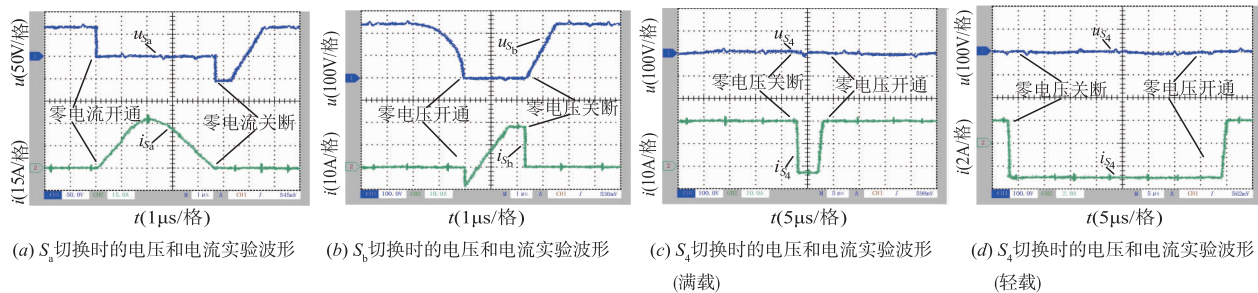


图 5 实验波形

### 4 结论

设计出了一种新型单相全桥谐振直流环节逆变器, 其优势是利用直流环节的升压电路能使直流环节稳态电压超过直流电源电压, 可增大逆变器输出线电压的基波幅值, 有利于改善逆变器直流电压利用率. 根据实验结果得到以下结论: 在轻载和满载时, 逆变器主开关都处于零电压软切换状态; 辅助开关分别处于零电流软切换状态和零电压软切换状态. 虽然本文提出的拓扑结构在直流环节设置辅助电路会增加电路的复杂性和硬件成本, 但是以此为代价, 能改善逆变器效率和直流电压利用率, 降低了用电成本. 因此, 该拓扑结构具有较高的应用价值.

### 参考文献

- [1] Mandrek S, Chrzan P J. Quasi-resonant DC-link inverter with a reduced number of active elements[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(4): 2088-2094.
- [2] Pan Zhiyang, Luo Fanglin. Transformer based resonant DC link inverter for brushless DC motor drive system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(4): 939-947.
- [3] 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-as-

- sisted commutation [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43 (10): 2133–2136. (in Chinese)
- [4] 王强, 刘岩松, 陈祥雪, 等. 具有低能耗辅助电路的并联谐振直流环节逆变器[J]. 电子学报, 2014, 42(7): 1369–1373.

- Wang Qiang, Liu Yansong, Chen Xiangxue, et al. Parallel resonant DC link inverter with low-loss auxiliary circuit [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(7): 1369–1373. (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



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

# 电子学报

2020 年第 12 期 Acta Electronica Sinica No. 12 2020  
(总第 454 期) (Monthly) (Series No. 454)

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