

## 新型单相全桥无源软开关逆变器

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:** 为改善单相全桥逆变器的运行效率, 设计出了一种新型单相全桥无源软开关逆变器, 在每个开关周期的换流过程中, 利用逆变器的低损耗辅助谐振电路, 使开关器件实现软切换以节约电能. 辅助谐振电路只含有电感、电容和二极管等无源器件, 不会使逆变器的控制变复杂. 此外, 在逆变器处于死区状态下, 负载电流可通过辅助电路进行续流, 减小了死区状态对逆变器输出电流波形的不利影响. 文中分析了电路的工作过程, 在功率为 3kW 的单相样机上的实验结果表明开关器件能实现软开关, 逆变器输出电流波形的畸变率得到了改善. 因此, 该拓扑结构对于研发高性能单相全桥逆变器具有重要参考价值.

**关键词:** 逆变器; 无源; 软开关; 零电流开通; 零电压关断

**中图分类号:** TM464

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2019)12-2653-04

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.12.027

## Novel Single-Phase Full-Bridge Passive Soft-Switching 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:** A topology of novel single-phase full-bridge passive soft-switching inverter is proposed to improve conversion efficiency of the single-phase full-bridge inverter. During the commutation process of each switching cycle, the low-loss auxiliary resonant circuit of the inverter is used to save energy. There are some passive devices such as inductor, capacitor and diode, which cannot complicate the control strategy of the inverter. In addition, freewheeling of load current can be realized via the auxiliary circuit and the distortion ratio of output current waveforms of the inverter is reduced when the inverter is in the dead state. The operation process of the circuit is analyzed. The experiment is carried out on a 3kW one-phase laboratory prototype. Experimental results verify that the switching devices of the inverter can achieve soft-switching and the distortion ratio of output current waveform of the inverter is improved. Therefore, the topology has an important reference value for the research and development of high performance single-phase full-bridge inverter.

**Key words:** inverter; passive; soft-switching; zero-current turn-on; zero-voltage turn-off

### 1 引言

逆变器高频化能减小逆变器中磁性元件重量和体积, 但是逆变器运行于高开关频率时, 开关损耗和电磁干扰噪音会显著增加, 开关损耗会降低逆变器运行效率, 电磁干扰噪音会对逆变器及其周围电气设备的运行产生负面影响. 为克服以上缺陷, 科研人员提出了具有辅助谐振电路的软开关逆变器, 能使开关器件实现软切换, 有利于提高开关频率, 降低开关损耗和电磁干扰<sup>[1,2]</sup>.

科研人员已经设计了一些实用型单相全桥无源软

开关逆变器, 但是其辅助谐振电路完善的空间很大, 例如文献[3,4]中的辅助电路均含有大体积变压器, 变压器剩磁的累加会使变压器铁芯饱和, 电能损耗增大, 变压器温度升高, 甚至会导致变压器损坏, 影响电路的正常运行, 而且文献[4]中的辅助电路还在直流母线之间设置了起均压作用的大电容, 在电路高频运行时将会出现中性点电位变化, 影响电路的稳定运行, 会给开关器件实现软切换带来消极影响. 此外, 文献[3,4]提出的软开关逆变器处于死区状态时, 负载电流不能通过辅助电路续流, 这会影响到逆变器输出电能的质量.

收稿日期: 2018-08-27; 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)

为改进上述电路中存在的不足,本文提出了一种新型单相全桥无源软开关逆变器,显著特点为:(1)辅助电路中无大体积的变压器和分压电容,不存在磁通复位问题和中性点电位漂移问题;(2)当逆变器处于死区状态时,辅助谐振电路中的储能元件可以向负载释放电能,实现了负载电流的续流,改善了逆变器输出电能的质量.本文详细分析了电路的工作过程,最后在一台额定功率为3kW的实验样机上验证了该逆变器的性能.

## 2 电路拓扑与工作流程分析

### 2.1 电路拓扑

图1为节能型单相全桥无源谐振极软开关逆变器主电路拓扑,由直流电源  $U_d$ 、辅助谐振电路和单相全桥逆变电路组成,其中辅助谐振电路由2个谐振电感  $L_r$  和  $L_s$ , 2个谐振电容  $C_{r1}$  和  $C_{r2}$ , 1个可以等效成电压源的储能电容  $C_s$  和5个辅助二极管  $D_{S0} \sim D_{S4}$  组成. 全桥逆变电路是由主开关  $S_1 \sim S_4$  以及反并联二极管  $D_1 \sim D_4$  组成. 在电路分析中设定:(1)元件都工作在理想状态;(2)负载电感值比谐振电感值大很多,在一个开关周期的工作过程中,负载电流保持不变,逆变器输出端可看作与恒流源相连;(3) $C_s$  的电容值远大于谐振电容值, $C_s$  可以等效为恒压源,电压为  $E$ . 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.

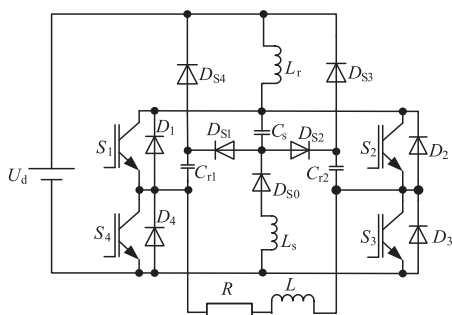


图1 新型单相全桥无源软开关逆变器主电路

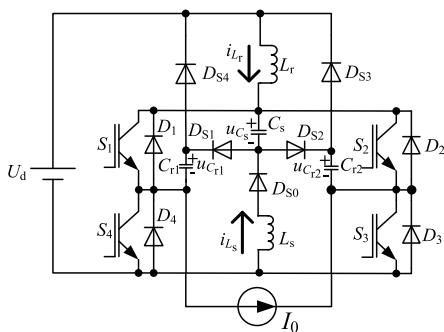


图2 逆变器的等效电路

### 2.2 电路的工作流程分析

一个开关周期包含7个工作流程,图3给出了电路

的特征工作波形,图4为各工作流程的等效电路图.

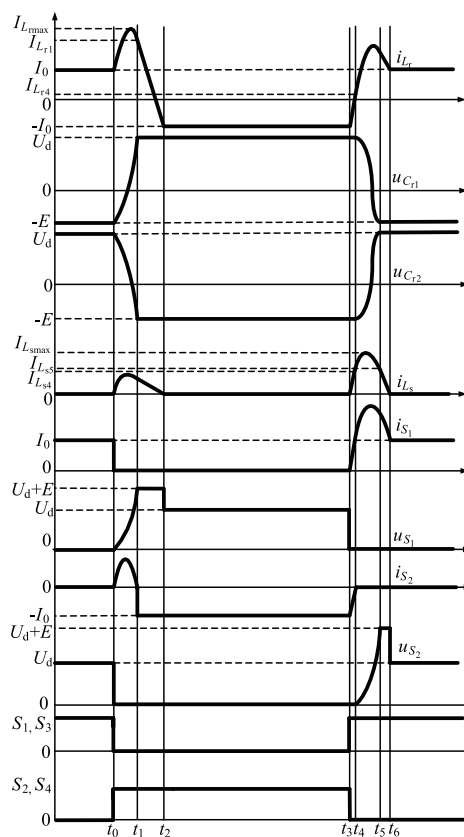


图3 谐振换流期间的理论工作波形

流程1( $t \sim t_0$ ): 电流流过主开关  $S_1$  和  $S_3$ , 此时电容  $C_{r1}$  的两端电压  $u_{C_{r1}}$  为  $-E$ , 电容  $C_{r2}$  的两端电压  $u_{C_{r2}}$  为  $U_d$ . 流过电感  $L_r$  的电流  $i_{L_r}$  等于负载电流  $I_0$ , 流过电感  $L_s$  的电流  $i_{L_s}$  等于零, 电路处于稳定状态.

流程2( $t_0 \sim t_1$ ): 在  $t_0$  时刻, 关断  $S_1$  和  $S_3$ , 开通  $S_2$  和  $S_4$ , 在  $C_{r1}$  和  $C_{r2}$  的作用下, 使  $S_1$  和  $S_3$  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  $S_1$  和  $S_3$  在关断时处于零电压软关断状态; 由于流过  $L_r$ 、 $L_s$  的电流不能突变, 限制了  $S_2$  和  $S_4$  发生开通动作时的电流上升速度, 因此  $S_2$  和  $S_4$  在开通时处于零电流软开通状态. 从  $t_0$  时刻开始,  $C_{r1}$ 、 $C_{r2}$ 、 $L_r$  和  $L_s$  进入谐振状态,  $C_{r1}$  处于反向放电状态,  $C_{r2}$  处于正向放电状态,  $L_r$  和  $L_s$  处于被正向充电的状态,  $u_{C_{r1}}$  从  $-E$  开始反向减小,  $u_{C_{r2}}$  从  $U_d$  开始正向减小,  $i_{L_r}$  从  $I_0$  开始正向增加,  $i_{L_s}$  从零开始正向增加. 当  $u_{C_{r1}}$  反向减小为零,  $u_{C_{r2}}$  正向减小为  $U_d - E$  时,  $i_{L_s}$  达到本流程中的最大值, 然后  $L_s$  开始处于正向放电状态,  $C_{r1}$  开始处于被正向充电的状态,  $i_{L_s}$  开始正向减小,  $u_{C_{r1}}$  从零开始正向增大. 当  $u_{C_{r1}}$  从零增大为  $U_d - E$ ,  $u_{C_{r2}}$  从  $U_d - E$  减小为零时,  $i_{L_r}$  增加到最大值  $I_{L_{rmax}}$ , 然后  $L_r$  开始正向放电,  $C_{r2}$  开始处于被反向充电的状态,  $i_{L_r}$  从最大值  $I_{L_{rmax}}$  开始逐渐减小,  $u_{C_{r2}}$  从零开始反

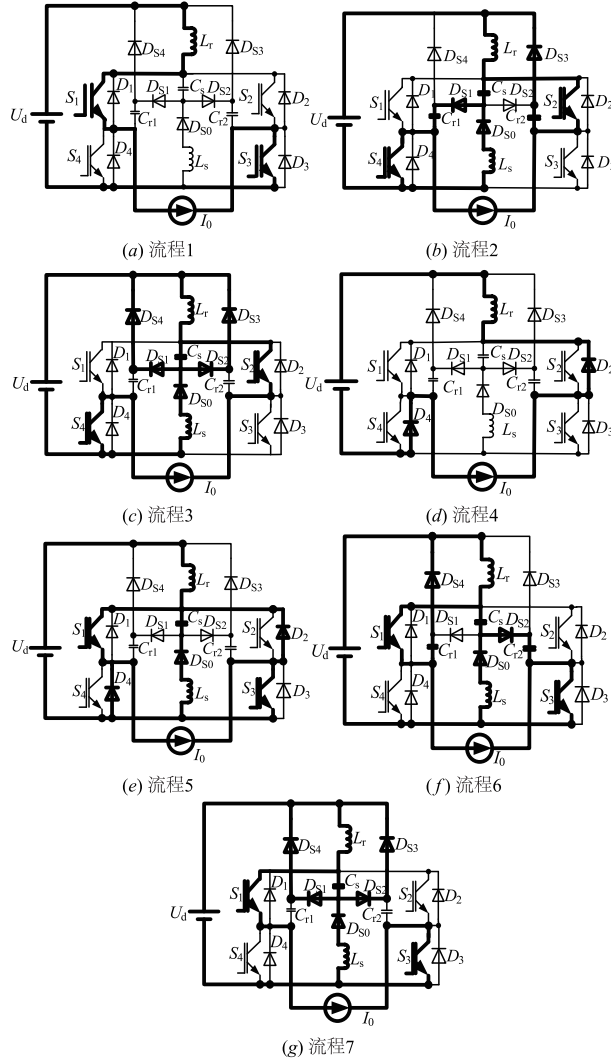


图4 各工作流程的等效电路图

向增大. 当  $i_{L_s}$  正向减小为零,  $u_{C_{r1}}$  正向增大为  $U_d$ ,  $u_{C_{r2}}$  反向增大为  $E$  时, 流程 2 结束.

流程 3 ( $t_1 \sim t_2$ ): 在该流程中,  $S_1$  和  $S_3$  承受的电压始终为  $U_d + E$ . 从  $t_1$  时刻开始,  $L_r$  中的剩余电能开始向  $C_s$  转移,  $i_{L_r}$  从  $I_{L_{r1}}$  开始线性减小,  $i_{L_s}$  从  $I_{L_{s1}}$  开始线性减小, 当  $i_{L_r}$  为零时,  $L_r$  放电状态结束. 然后  $L_r$  处于反向充电状态, 当  $i_{L_r}$  为  $-I_0$ ,  $i_{L_s}$  为零时, 流程 3 结束.

流程 4 ( $t_2 \sim t_3$ ): 在  $t_2$  时刻, 负载电流  $I_0$  开始通过  $D_2$  和  $D_4$  续流. 主开关  $S_1$  和  $S_3$  承受的电压始终为  $U_d$ . 在该流程中辅助电路停止工作, 电路处于稳定状态.

流程 5 ( $t_3 \sim t_4$ ): 在  $t_3$  时刻, 开通  $S_1$  和  $S_3$ , 关断  $S_2$  和  $S_4$ ,  $L_r$  和  $L_s$  限制了  $S_1$  和  $S_3$  发生开通动作时的电流上升速度, 因此  $S_1$  和  $S_3$  在开通时处于零电流软开通状态, 同时因为在  $S_2$  和  $S_4$  关断时, 有电流流过  $D_2$  和  $D_4$ , 使  $S_2$  和  $S_4$  的端电压为零, 所以  $S_2$  和  $S_4$  的关断损耗等于零. 在  $S_1$  和  $S_3$  开通后,  $L_r$  承受的电压大小为  $U_d$ ,  $L_s$  承受的电压大小为  $E$ .  $i_{L_r}$

从  $-I_0$  开始反向线性减小, 流过  $L_s$ ,  $S_1$  和  $S_3$  的电流从零开始正向线性增加, 流过  $D_2$  和  $D_4$  的电流开始线性减小, 当流过  $D_2$  和  $D_4$  的电流减小为零时, 流程 5 结束.

流程 6 ( $t_4 \sim t_5$ ): 从  $t_4$  时刻开始,  $C_{r1}$ ,  $C_{r2}$ ,  $L_r$  和  $L_s$  进入谐振状态,  $C_{r1}$  处于正向放电状态,  $C_{r2}$  处于反向放电状态,  $L_r$  和  $L_s$  处于被正向充电的状态,  $u_{C_{r1}}$  从  $U_d$  开始正向减小,  $u_{C_{r2}}$  从  $-E$  开始反向减小,  $i_{L_r}$  从  $I_{L_{r4}}$  开始正向增加,  $i_{L_s}$  从  $I_{L_{s4}}$  开始正向增加. 当  $u_{C_{r1}}$  正向减小为  $U_d - E$ ,  $u_{C_{r2}}$  反向减小为零时,  $i_{L_s}$  正向增大到本流程中的最大值, 然后  $L_s$  开始处于正向放电状态,  $C_{r2}$  开始处于被正向充电的状态,  $i_{L_s}$  开始正向减小,  $u_{C_{r2}}$  从零开始正向增大. 当  $u_{C_{r1}}$  从  $U_d - E$  减小为零,  $u_{C_{r2}}$  从零增大为  $U_d - E$  时,  $i_{L_r}$  增加到最大值, 然后  $L_r$  开始正向放电,  $C_{r1}$  开始处于被反向充电的状态,  $i_{L_r}$  从最大值开始逐渐减小,  $u_{C_{r1}}$  从零开始反向增大. 当  $i_{L_s}$  正向减小为零,  $u_{C_{r1}}$  反向增大为  $E$ ,  $u_{C_{r2}}$  正向增大为  $U_d$  时, 流程 6 结束.

流程 7 ( $t_5 \sim t_6$ ): 该流程中,  $L_r$  承受的电压为  $E$ ,  $L_s$  承受的电压为  $U_d$ ,  $L_r$  和  $L_s$  均处于放电状态.  $i_{L_r}$  从  $I_{L_{r5}}$  开始线性减小,  $i_{L_s}$  从  $I_{L_{s5}}$  开始线性减小. 当  $i_{L_r}$  减小到  $I_0$ ,  $i_{L_s}$  减小到零时, 流程 7 结束.

至此, 电路在 1 个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 1 个开关周期的工作.

### 3 实验结果

根据图 1 所示的主电路, 完成了实验样机的研制. 样机参数如下: 额定输出功率  $P_0 = 3\text{kW}$ , 负载电阻  $R = 18\Omega$ , 负载电感  $L = 1\text{mH}$ , 直流电源电压  $U_d = 300\text{V}$ , 电容  $C_s$  的两端电压  $E = 150\text{V}$ , 最大负载电流  $I_{0\text{max}} = 15\text{A}$ , 开关频率  $f_c = 20\text{kHz}$ , 输出频率  $f_0 = 50\text{Hz}$ , 谐振电感  $L_r = L_s = 15\mu\text{H}$ , 谐振电容  $C_{r1} = C_{r2} = 33\text{nF}$ , 死区时间  $\Delta = 1\mu\text{s}$ , 逆变器输出电压有效值  $U_{\text{out}}$  为  $150\text{V}$ .

图 5 给出了相关实验波形, 图 5(a) 给出了在一个开关周期内, 电容  $C_{r1}$ ,  $C_{r2}$  两端的电压  $u_{C_{r1}}$ ,  $u_{C_{r2}}$ , 流过电感  $L_r$  的电流  $i_{L_r}$  的实验波形, 可以看出实验波形与图 3 所示的理论特征波形基本相符. 图 5(b) 给出了本文提出单相全桥软开关逆变器输出电流  $i_a$  的实验波形, 输出的电流波形比较光滑, 是良好的正弦波, 并没有因为增加辅助电路而使逆变器输出波形产生畸变. 图 5(c) 和图 5(d) 给出了逆变器在满载运行和轻载运行时, 主开关  $S_1$  动作过程中承受的电压  $u_{S1}$  和电流  $i_{S1}$  的实验波形, 从图 5(c) 和图 5(d) 可以看出, 在开关开通时刻, 流过主开关  $S_1$  的电流上升的速度被抑制, 所以轻载和满载时都实现了主开关  $S_1$  的零电流软开通; 从图 5(c) 和图 5(d) 还可以看出在主开关  $S_1$  关断时刻, 其两端电压从零开始以较小的变化率缓

慢增加,所以轻载和满载时都实现了主开关  $S_1$  的零电压软关断. 图 5(e) 和图 5(f) 分别为在低输出频率 5Hz 情形下,硬开关逆变器与本文的软开关逆变器输出端的电流

实验波形,能发现硬开关逆变器输出电流波形畸变严重,而本文设计的软开关逆变器输出电流波形无畸变. 从而验证死区状态对该逆变器无影响.

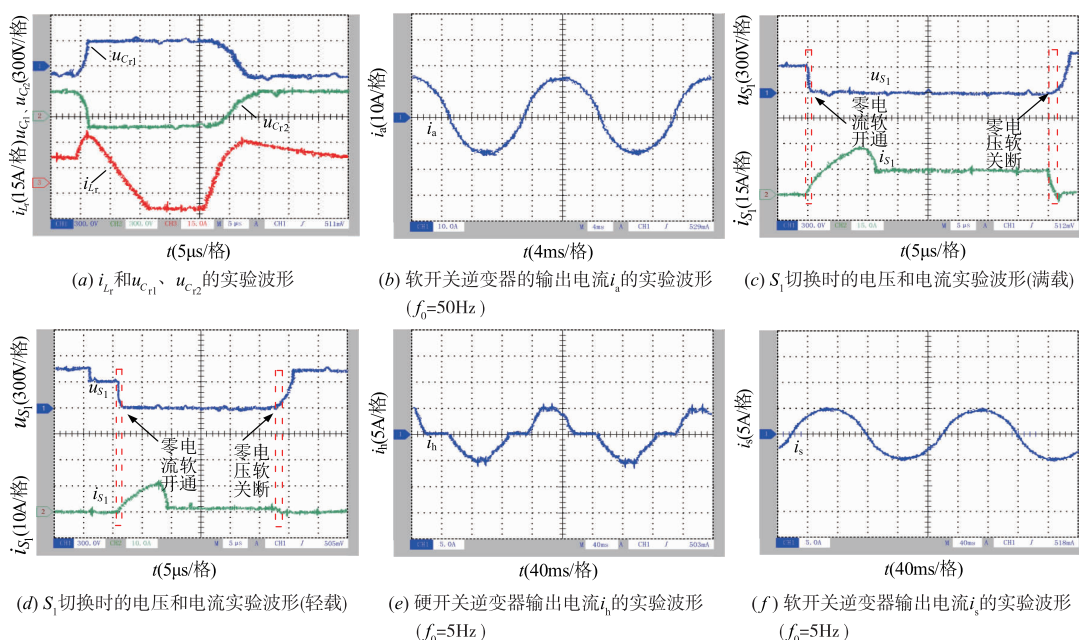


图5 实验波形

## 4 结论

设计了一种具有较高实用性的单相全桥无源谐振极软开关逆变器,显著特点是其辅助电路无大体积的变压器和分压电容,当逆变器处于死区状态下,负载电流可通过辅助电路进行续流,减小了死区状态对逆变器输出电流波形的不利影响. 通过实验验证得到以下结论:(1)在轻载和满载情形下,功率开关器件均实现零电压软关断和零电流软开通;(2)与硬开关逆变器相比,本文的软开关逆变器输出的低频率电流波形的畸变率显著降低. 本文的研究成果为将来研发高性能单相全桥逆变器奠定了基础.

## 参考文献

- [1] 王强,胡斐,王天施,等. 箝位二极管承受低电压的有源箝位谐振直流环节逆变器[J]. 电子学报,2017,45(12): 3025 – 3029.  
Wang Qiang, Hu Fei, Wang Tianshi, et al. Active clamped resonant DC-link inverter with clamped diode under low voltage[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(12): 3025 – 3029. (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] K Mark Smith, Keyue Ma Smedley. Lossless passive soft-switching methods for inverters and amplifiers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(1): 164 – 173.
- [4] Mangesh Borage, Sunil Tiwari, Swaran Kotaiah. A passive auxiliary circuit achieves zero-voltage-switching in full-bridge converter over entire conversion range [J]. IEEE Power Electronics Letters, 2005, 3(4): 141 – 143.

## 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



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