

控制简单的节能型单相全桥逆变器

王 强^{1,2}, 王有政^{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: 为改善单相全桥逆变器的功率变换效率, 提出了一种控制简单的节能型单相全桥软开关逆变器拓扑结构. 逆变器采用简单的受限单极式正弦脉宽调制方法, 在每个开关周期的工作过程中, 仅需切换1个主开关和1个辅助开关, 而且不需要设定谐振电流阈值和实时检测负载电流来控制辅助开关, 使逆变器的可靠性和实用性得到改善. 在逆变器工作过程中, 利用辅助电路使主开关实现零电流软开通和零电压软关断, 辅助开关也能实现零电流软开通, 通过降低开关损耗来实现逆变器节能运行. 文中分析了电路工作过程. 搭建了一台2 kW样机, 实验结果表明主开关和辅助开关都实现了软切换, 这为进一步研发高性能的实用新型单相全桥软开关逆变器奠定了理论和技术基础.

关键词: 逆变器; 谐振电路; 零电压关断; 零电流开通; 正弦脉宽调制

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)03-0764-05

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

DOI: 10.12263/DZXB.20180932

An Energy-Saving Single-Phase Full Bridge Inverter with Simple Control

WANG Qiang^{1,2}, WANG You-zheng^{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: A topology of an energy-saving single-phase full bridge inverter with simple control is proposed to improve power conversion efficiency of single-phase full bridge inverter. Simple limited unipolar sinusoidal pulse width modulation is applied in the inverter. Only one main switch and one auxiliary switch need to be controlled in the working process in every switching period. Moreover, setting threshold of resonant current and load current need not to be designed to control the auxiliary switch, thus improving the reliability and practicability of the inverter. During the operation of the inverter, the auxiliary circuit is used to make the main switch achieve zero-current turn on and zero-voltage turn off, and the auxiliary switch also achieves zero-current turn on. Energy-saving operation of the inverter is achieved by reducing the switching loss. In this paper, the working process of the circuit is analyzed. The experimental results on a single-phase prototype with rated power of 2 kW show that the switching devices could achieve soft-switching, which lays a theoretical and technical foundation for further research and development of a new practical single-phase full-bridge soft-switching inverter with high performance.

Key words: inverter; resonant circuit; zero-voltage turn off; zero-current turn on; sinusoidal pulse width modulation

1 引言

目前, 现代电力电子变流技术正朝着高性能、高频化、大容量的方向发展. 逆变器高频化可以大大减少逆变器中磁性元件体积和重量. 但是, 随着开关器件的开关频率不断提高, 开关损耗和电磁干扰噪音会显著增

大, 逆变器的转换效率会因为开关损耗的增大而降低. 软开关谐振变流技术通过添加必要的辅助谐振单元而使开关元件取得零电压或者零电流软切换, 进而降低开关损耗, 减小电磁干扰、抑制谐波污染, 提高逆变效率, 使逆变装置具有更优的性能指标^[1].

收稿日期: 2018-10-24; 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)

辅助谐振电路接在逆变器桥臂中点和直流母线之间的是谐振极逆变器,研究人员已经设计了多种单相全桥谐振极逆变器拓扑结构^[2,5],但是仍存在不足之处.例如文献[3]中的辅助电路含有4个辅助开关,辅助开关的数量较多会导致辅助电路硬件成本较高且控制复杂,影响逆变器的可靠性和实用性;文献[4,5]中的辅助电路进入谐振状态之前,需要使流过谐振电感的电流达到设定值,使控制复杂化.

本文提出了一种新型单相全桥软开关逆变器,相比于相关文献提出的同类型逆变器,具有以下优势:(1)逆变器采用简单的受限单极式正弦脉宽调制方法,在每个开关周期内,仅需改变1个主开关和1个辅助开关的触发脉冲,无需通过配置电感电流阈值来控制辅助开关,实现了逆变器控制简单化;(2)辅助电路结构简单,仅含有1个辅助开关和少量无源器件,无大体积的变压器和分压电容,有利于降低辅助电路硬件成本和改善逆变器的可靠性.文中分析了电路在一个开关周期内的工作流程,在额定功率为2 kW的实验样机上验证了该单相全桥软开关逆变器的性能.

2 电路工作过程分析

2.1 电路结构

图1给出了一种控制简单的节能型单相全桥逆变器电路拓扑,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 、 L_s ,3个谐振电容 C_r 、 C_{s1} 和 C_{s2} ,1个辅助开关 S_a 及其反并联二极管 D_{s0} 和辅助二极管 $D_{s0} \sim D_{s5}$ 组成.全桥逆变电路是由主开关 $S_1 \sim S_4$ 及其反并联二极管 $D_1 \sim D_4$ 、负载电感 L 和负载电感 R 组成.

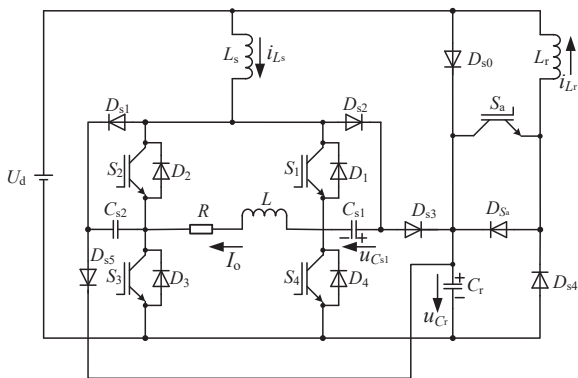


图1 控制简单的节能型单相全桥逆变器主电路

2.2 工作流程

在分析电路工作过程时,作出以下假设:(1)所有元件都看作理想元件;(2)阻感性负载中的电感值远大于辅助电路中的电感值,负载电流在一个开关周期中保持不变,即可将该阻感性负载看成是电流大小恒为 I_o

的恒流源.各部分电压和电流的正方向已在图1中标出.12个流程被包含在电路每个开关周期的工作过程,图2给出了电路的特征工作波形,图3为各工作流程的等效电路图.

(1)流程1($t \sim t_0$):电流流过主开关 S_1 和 S_3 ,此时电容 C_{s1} 的两端电压 u_{Cs1} 为零,电容 C_r 的两端电压 u_{Cr} 为 U_d ,流过电感 L_s 的电流 i_{Ls} 等于负载电流 I_o ,电路处于稳定状态.

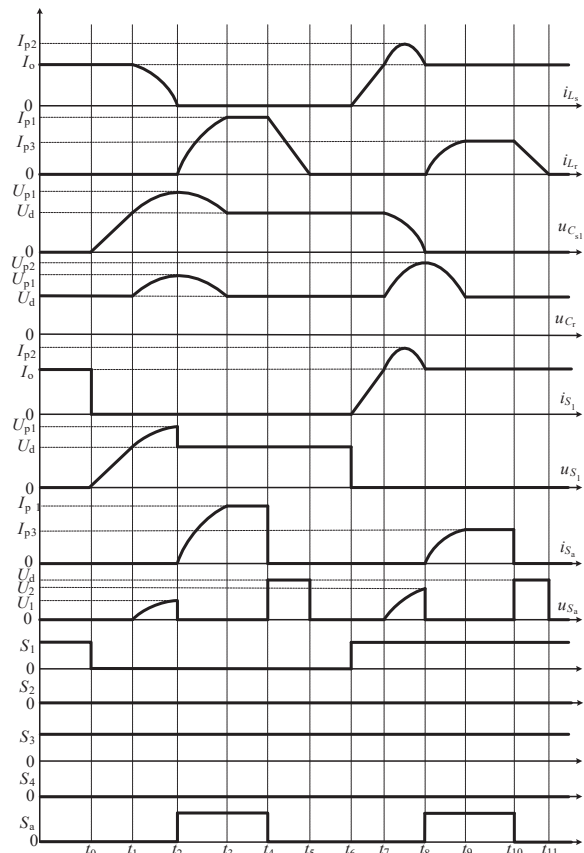


图2 谐振换流期间的理论工作波形

(2)流程2($t_0 \sim t_1$):在 t_0 时刻,关断主开关 S_1 ,在电容 C_{s1} 的作用下,使主开关 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,所以主开关 S_1 在关断时处于零电压软关断状态.从 t_0 时刻开始,流过 C_{s1} 的电流等于 I_o , u_{Cs1} 从零开始正向线性增大.在 t_1 时刻, u_{Cs1} 正向线性增大到 U_d 时,流程2结束.

(3)流程3($t_1 \sim t_2$):在 t_1 时刻, L_s 、 C_r 和 C_{s1} 进入谐振状态, L_s 处于正向放电状态, C_r 和 C_{s1} 处于被正向充电的状态, i_{Ls} 从 I_o 开始正向减小,流过二极管 D_4 的电流开始增大, u_{Cr} 和 u_{Cs1} 从 U_d 开始正向增大,在变化过程中, u_{Cr} 等于 u_{Cs1} .在 t_2 时刻, i_{Ls} 开始正向减小到零,流过 D_4 的电流等于 I_o , u_{Cr} 和 u_{Cs1} 增大到 U_{p1} , u_{Sa} 增加到 U_1 时,流程3结束.

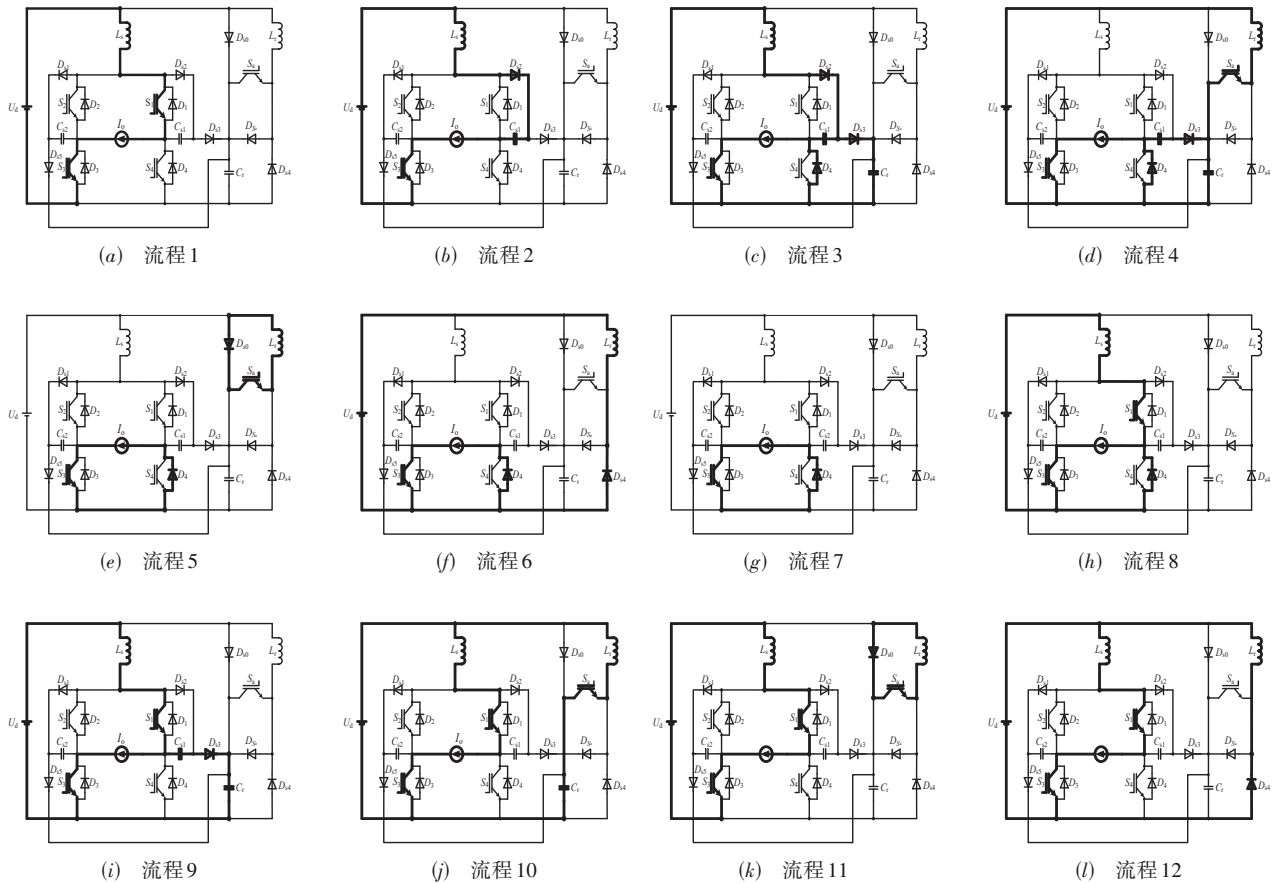


图3 各工作流程的等效电路图

(4) 流程4 ($t_2 \sim t_3$): 在 t_2 时刻, 开通辅助开关 S_a , L_r 限制了 S_a 发生开通动作时的电流上升速度, 因此 S_a 在开通时处于零电流软开通状态. 从 t_2 时刻开始, L_r 、 C_r 和 C_{s1} 进入谐振状态, L_r 处于被正向充电状态, C_r 和 C_{s1} 处于反向放电的状态, i_{L_r} 从零开始正向增大, u_{C_r} 和 $u_{C_{s1}}$ 从 U_{p1} 开始正向减小. 在 t_3 时刻, u_{C_r} 和 $u_{C_{s1}}$ 正向减小到 U_d , i_{L_r} 正向增大到 I_{p1} 时, 流程 4 结束.

(5) 流程5 ($t_3 \sim t_4$): 在 t_3 时刻, L_r 、 C_r 和 C_{s1} 谐振结束, 电流开始流过 D_{s0} , i_{L_r} 开始在 D_{s0} 、 S_a 和 L_r 组成的闭合回路内续流, I_0 通过主开关 S_3 和 D_4 实现续流. 在 t_4 时刻, 关断 S_a , 流程 5 结束.

(6) 流程6 ($t_4 \sim t_5$): 从 t_4 时刻开始, L_r 承受电压等于 U_d , L_r 处于正向放电状态, i_{L_r} 从 I_{p1} 开始正向线性减小, 储存在 L_r 中的电能开始回馈给直流电源. 在 t_5 时刻, i_{L_r} 正向减小到零时, 流程 6 结束.

(7) 流程7 ($t_5 \sim t_6$): 从 t_5 时刻开始, I_0 继续通过 S_3 和 D_4 实现续流, 辅助电路不工作, 电路处于稳态.

(8) 流程8 ($t_6 \sim t_7$): 在 t_6 时刻, 开通主开关 S_1 , L_s 限制了主开关 S_1 发生开通动作时的电流上升速度, 因此主开关 S_1 在开通时处于零电流软开通状态. 从 t_6 时刻开

始, L_s 承受电压等于 U_d , L_s 处于被正向充电状态, i_{L_s} 从零开始正向线性增大, 同时流过 D_4 的电流开始线性减小. 在 t_7 时刻, i_{L_s} 正向线性增大到 I_0 , 流过 D_4 的电流等于零时, 流程 8 结束.

(9) 流程9 ($t_7 \sim t_8$): 在 t_7 时刻, L_s 、 C_r 和 C_{s1} 进入谐振状态, L_s 处于被正向充电状态, C_{s1} 处于反向放电状态, C_r 处于被正向充电状态, i_{L_s} 从 I_0 开始继续正向增大, $u_{C_{s1}}$ 从 U_d 开始正向减小, u_{C_r} 从 U_d 开始正向增大. 当 $u_{C_{s1}} + U_d = u_{C_r}$ 时, i_{L_s} 正向增大到最大值 I_{p2} . 然后 L_s 开始处于正向放电状态, C_{s1} 继续处于反向放电状态, C_r 继续处于被正向充电状态, i_{L_s} 从 I_{p2} 开始正向减小, $u_{C_{s1}}$ 继续正向减小, u_{C_r} 继续正向增大. 在 t_8 时刻, i_{L_s} 正向减小到 I_0 , u_{C_r} 正向增大到 U_{p2} , $u_{C_{s1}}$ 正向减小到 U_{p3} , u_{S_a} 增加到 U_2 时, 流程 9 结束.

(10) 流程10 ($t_8 \sim t_9$): 在 t_8 时刻, 开通辅助开关 S_a , L_r 限制了 S_a 发生开通动作时的电流上升速度, 因此 S_a 在开通时处于零电流软开通状态. 从 t_8 时刻开始, L_r 和 C_r 进入谐振状态, L_r 处于被正向充电状态, C_r 处于反向放电状态, i_{L_r} 从零开始正向增大, u_{C_r} 从 U_{p2} 开始正向减小. 在 t_9 时刻, u_{C_r} 正向减小到 U_d , i_{L_r} 正向增大到 I_{p3} 时, 流程 10 结束.

(11) 流程 11($t_9 \sim t_{10}$): 在 t_9 时刻, L_r 和 C_r 谐振结束, 电流开始流过 D_{s0} , i_{L_r} 开始在 D_{s0} , 辅助开关 S_a 和 L_r 组成的闭合回路内续流, I_0 流过主开关 S_1 和 S_3 . 在 t_{10} 时刻, 关断辅助开关 S_a , 流程 11 结束.

(12) 流程 12($t_{10} \sim t_{11}$): 从 t_{10} 时刻开始, L_r 承受电压等于 U_d , L_r 处于正向放电状态, i_{L_r} 从 I_{p3} 开始正向线性减小, 储存在 L_r 中的电能开始回馈给直流电源. 在 t_{11} 时刻, i_{L_r} 正向减小到零时, 流程 12 结束.

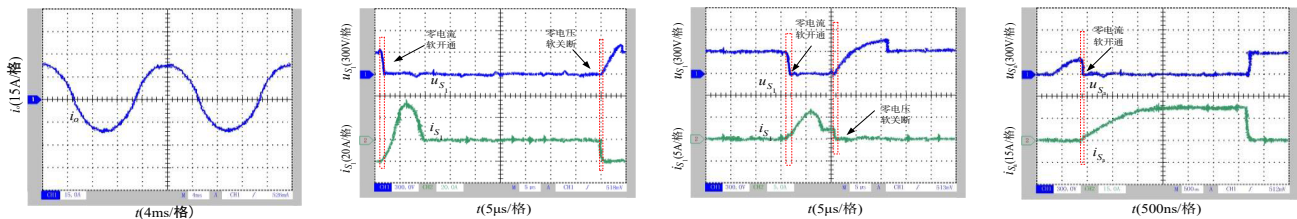
然后电路将返回流程 1, 进入下一个开关周期.

3 实验结果

样机参数如下: 额定输出功率 $P_0=2$ kW, 负载电阻 $R=10 \Omega$, 负载电感 $L=1$ mH, 直流电源电压 $U_d=300$ V, 最大负载电流 $I_{\text{omax}}=20$ A, 主开关的开关频率 $f_c=20$ kHz, 输出频率 $f_0=50$ Hz, 谐振电感 $L_s=6 \mu\text{H}$, $L_r=31 \mu\text{H}$, 谐振电容 $C_{s1}=C_{s2}=C_r=0.1 \mu\text{H}$.

图 4(a) 给出了样机输出的电流实验波形, 输出频

率为 50 Hz, 可以看出输出的电流波形比较光滑, 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 4(b) 和图 4(c) 分别给出了在满载和轻载时, 逆变器上桥臂主开关 S_1 进行切换动作时的端电压 u_{S_1} 和流过的电流 i_{S_1} 的实验波形. 从图 4(b) 和图 4(c) 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 4(b) 和图 4(c) 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 4(d) 给出了辅助开关 S_a 进行切换动作时的端电压 u_{S_a} 和电流 i_{S_a} 的实验波形. 从图 4(d) 可以看出 S_a 开通时, i_{S_a} 以较低变化率正向缓慢增大, 实现了 S_a 零电流软开通, 但是从图 4(d) 也可看出 S_a 关断时 u_{S_a} 的上升速度没有被限制, S_a 没有实现软关断, 这需要在以后的研究工作中对其辅助电路进一步优化, 以实现辅助开关开通和关断都是软切换.



(a) 软开关逆变器输出电流 i_o 的实验波形 (b) S_1 切换时的电压和电流实验波形(满载) (c) S_1 切换时的电压和电流实验波形(轻载) (d) S_a 切换时的电压和电流实验波形

图 4 实验波形

4 结论

设计出了一种控制简单的单相全桥谐振极软开关逆变器, 显著特点是辅助电路只有 1 个辅助开关, 而且逆变器采用受限单极式正弦脉宽调制方法, 使辅助电路控制简单化. 经实验验证得到的结论如下: (1) 逆变器主开关在切换过程中能完成零电流软开通和零电压软关断; (2) 逆变器输出电流波形为光滑正弦波, 增设的辅助电路对逆变器的输出无影响.

参考文献

[1] CHU Enhui, WU Mengyang, Huang Liang, et al. Research on a novel modulation strategy for auxiliary resonant commutated pole inverter with the smallest loss in auxiliary commutation circuits[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1103-1117.
 [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] WANG Chien-Ming, SU Ching-Hung, JIANG Maoh-Chin, 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.

[5] 寇宝泉, 张海林, 张赫, 等. 改进型零电压转换 PWM 软开关功率变换器的实现机理分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(14): 116-126.

KOU Baoquan, ZHANG Hailin, ZHANG He, et al. The

analysis of a novel zero-voltage-transition PWM soft-switching power converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(14): 116-126. (in Chinese)

作者简介



王 强 男,1981年10月出生辽宁省沈阳市,博士,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月出生辽宁省本溪市,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