

中小功率单相全桥节能型谐振极逆变器

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: 中小功率单相全桥逆变器常以金属氧化物半导体场效应晶体管(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET)作为开关器件,为实现逆变器在高开关频率下的节能运行,本文提出了一种单相全桥节能型谐振极逆变器拓扑结构,其桥臂上分别并联相同的辅助谐振电路. 桥臂上的主开关开通前,其并联的谐振电容的电压能周期性变为零,使主开关完成零电压软开通,可消除 MOSFET 的容性开通损耗,有利于逆变器的节能运行. 本文分析了电路的工作模态,实验结果表明主开关器件处于零电压软切换. 因此,该拓扑结构对于研发高性能的中小功率单相全桥逆变器具有参考价值.

关键词: 逆变器; 桥臂; 辅助电路; 并联; 开关损耗; 零电压开通; 谐振

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)11-2263-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.11.024

Medium and Small Power Single-Phase Full-Bridge Energy-Saving Resonant Pole Inverter

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: Metal oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET) is often used as the switching devices in medium and small power single-phase full-bridge inverters. To realize energy-saving operation of the inverters at high switching frequency, a single-phase full-bridge energy-saving resonant pole inverter topology is proposed. The same auxiliary resonant circuit is connected with parallel on the bridge arm. Before the main switch on the bridge arm is switched on, the voltage across its parallel resonant capacitor becomes zero periodically, which makes the main switch achieve zero-voltage soft-switching and eliminates the capacitive switching loss of MOSFET. It is conducive to the energy-saving operation of the inverter. In this paper, the working mode of the circuit is analyzed. The experimental results show that the main switching devices achieve zero-voltage soft-switching. Therefore, this topology has reference value for the research and development of high-performance medium and small power single-phase full-bridge inverters.

Key words: inverter; bridge arm; auxiliary circuit; parallel; switching loss; zero-voltage turn on; resonance

1 引言

在现代电力电子技术中,为获得更高功率密度和更快动态响应的逆变器,应提高逆变器的开关频率. 提高开关频率有利于降低装置的体积和重量,但在这种情况下,电磁干扰和射频干扰噪声以及开关损耗也会增加,导致电路效率严重下降. 为了解决上述问题,需采

用软开关技术,其基本特征是在开关过程前后引入谐振,使开关开通前电压先降到零,关断前电流先降到零,就可以消除开关过程中电压、电流的重叠,从而减小开关损耗,实现逆变器的高频节能运行.

相关文献已提出多种单相全桥谐振极逆变器拓扑结构,但是仍然需要优化. 例如文献[1]中的辅助电路里的4个辅助开关在每个开关周期都要参与换流过程,

收稿日期:2019-05-30;修回日期:2019-07-05;责任编辑:覃怀银

基金项目:辽宁省教育厅科学研究经费项目(No. L2019017);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)

导致辅助电路控制复杂,影响逆变器的可靠性和实用性;文献[2]中的辅助开关器件的触发脉冲占空比为固定值,在每个开关周期内流过谐振电感的电流能通过辅助开关形成稳态环流,不利于降低辅助电路损耗;文献[3,4]中的主开关器件能实现零电流软开通,不能实现零电压软开通,当采用 MOSFET 作为开关器件时,存在容性开通损耗。

本文提出了一种单相全桥节能型谐振极逆变器,其优势如下:(1)辅助开关在谐振过程结束之后立刻完成关断,谐振电感中的剩余电能直接向直流电源回馈,流过谐振电感的电流不会通过辅助电路形成稳态环流,有利于降低辅助电路损耗;(2)逆变器采用受限单极式正弦脉宽调制方法,在每个开关周期中,只有 1 个桥臂上的辅助电路参与换流,只需 2 个辅助开关的触发脉冲发生切换;(3)主开关可实现零电压软开通,在 MOSFET 作为开关器件时,可消除容性开通损耗,有利于逆变器节能运行.文中详细分析了电路在一个开关周期内的工作模式,在额定功率为 2kW 的实验样机上验证了该单相全桥软开关逆变器的性能。

2 电路拓扑描述与工作模式分析

2.1 电路结构及控制方式

本文提出的中小功率节能型单相全桥谐振极逆变器主电路拓扑如图 1 所示,主电路由三部分构成.第一部分是直流电源 U_d ;第二部分是由主开关 $S_1 \sim S_4$ 及其反并联二极管 $D_1 \sim D_4$,负载电感 L 和负载电阻 R 组成的单相全桥逆变电路;第三部分是由 4 个谐振电容 $C_1 \sim C_4$ 、2 个谐振电感 L_{r1} 和 L_{r2} 、4 个辅助开关 $S_{a1} \sim S_{a4}$ 及其反并联二极管 $D_{a1} \sim D_{a4}$ 、二极管 $D_{s1} \sim D_{s6}$ 组成的 2 组分别与逆变器桥臂并联的辅助谐振电路 A 和 B. 该逆变器采用受限单极式正弦脉宽调制方法,负载电流方向为图 1 所示的正方向时,主开关 S_1 处于高频切换状态,辅助电路 A 参与换流过程;负载电流为负方向时,主开关 S_2 处于高频切换状态,辅助电路 B 参与换流过程. 这样在每个开关周期中,只有一组辅助电路参与换流,有利于实现节能降耗. 逆变器主开关实现零电压软开关,其原理是利用辅助谐振电路使主开关在开通前的端电压先变为零,从而实现零电压软开通;利用辅助电路使开关关断时端电压的变化率显著降低,从而实现零电压软关断. 所有辅助开关均实现零电流软开通,其原理是利用辅助谐振电路来降低开通时流过开关器件的电流变化率,从而实现零电流软开通. 在分析电路时做出以下假设:(1)电路中所有元器件均处于理想工作状态;(2)负载电感值足够大,在一个开关周期内的负载电流可看作固定值,逆变器输出端可看作与恒流源相连. 谐振电容电压和谐振电感电流的正方向已在图 1 中标出。

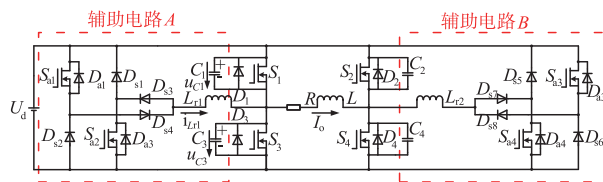


图1 中小功率节能型单相全桥谐振极逆变器主电路

2.2 电路的工作模式

9 个工作模式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 给出了各工作模式的等效电路图。

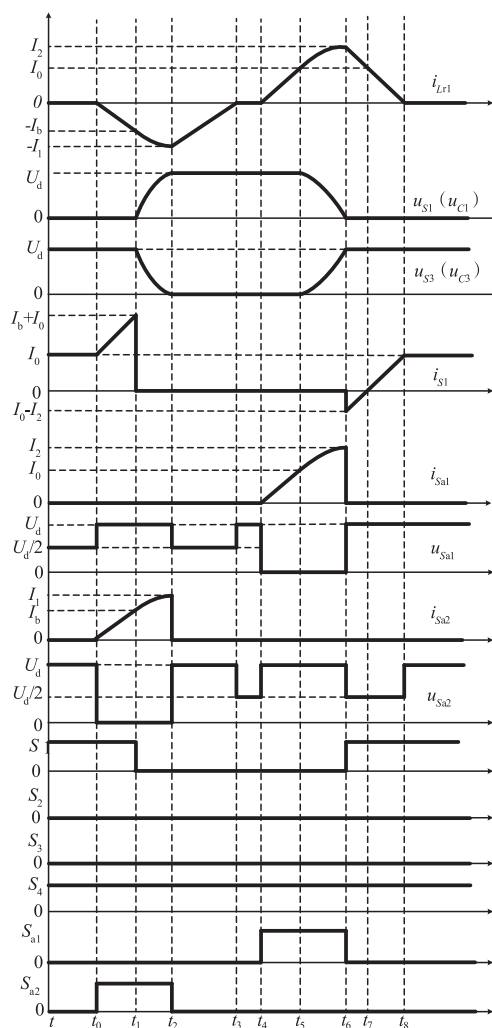


图2 谐振换流期间的理论工作波形

模式 1 ($t \sim t_0$): 流过 S_1 和 S_4 的电流与负载电流 I_0 相等,辅助谐振回路不工作,电路处于稳定状态。

模式 2 ($t_0 \sim t_1$): 在 t_0 时刻,开通 S_{a2} . 从 t_0 时刻开始, L_{r1} 处于被充电状态, i_{Lr1} 从零开始反向线性增大. 在 t_1 时刻, i_{Lr1} 反向增大到设定值 I_0 时,模式 2 终止。

模式 3 ($t_1 \sim t_2$): 在 t_1 时刻,关断 S_1 . 从 t_1 时刻开始, L_{r1} 与 C_1 、 C_3 同时进入谐振状态, L_{r1} 、 C_1 处于被充电状态,

C_3 处于放电状态. $i_{L_{r1}}$ 从 $-I_b$ 开始反向增加, u_{C_1} 从零开始正向增加, u_{C_2} 从 U_d 开始正向减小. 当 u_{C_1} 正向增大到 U_d ,

u_{C_1} 正向减小到零, $i_{L_{r1}}$ 增大到反向最大值 $-I_1$ 时, 模式 3 终止.

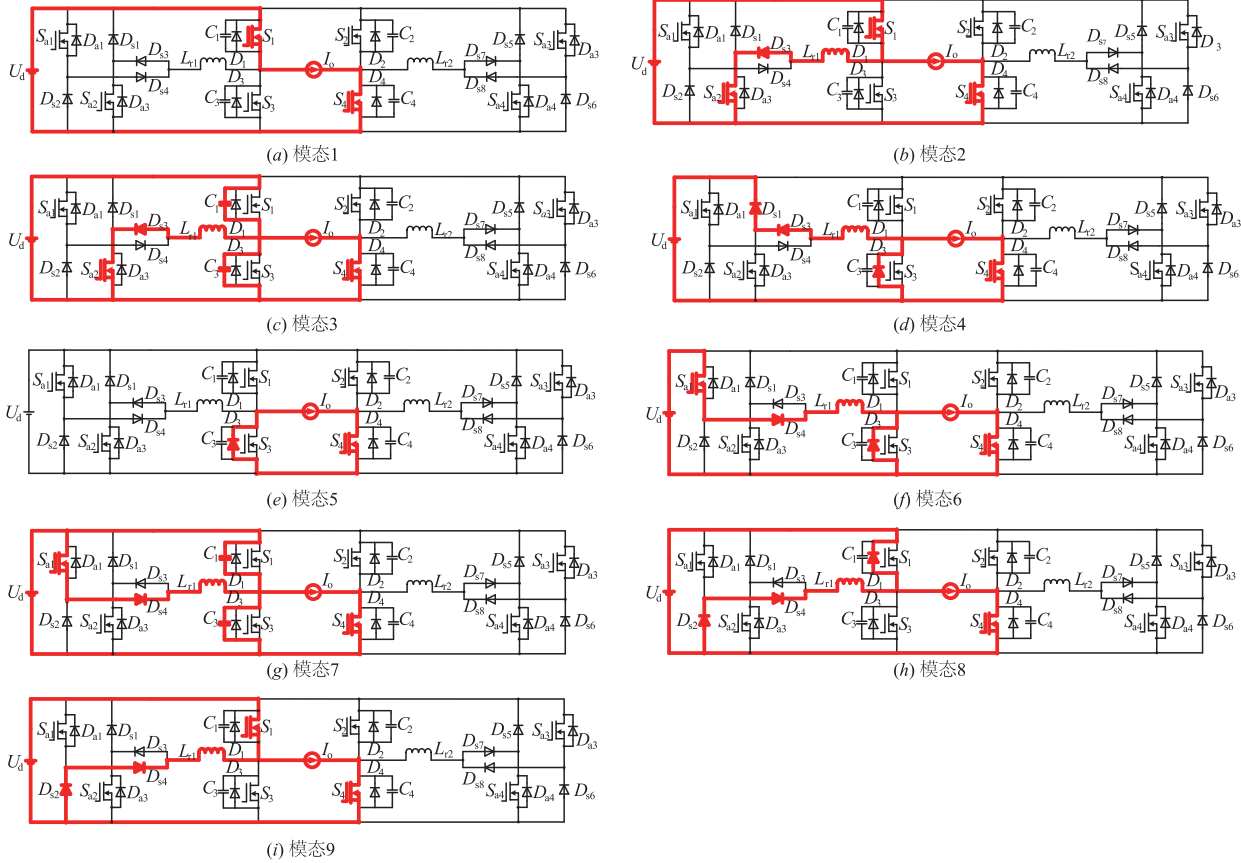


图3 各工作模式的等效电路图

模式 4 ($t_2 \sim t_3$): 在 t_2 时刻, 关断 S_{a2} . 从 t_2 时刻, D_{s1} 开始导通, L_{r1} 处于放电状态, $i_{L_{r1}}$ 从 $-I_1$ 开始反向线性减小. 当 $i_{L_{r1}}$ 减小到零时, 辅助谐振回路停止工作, 模式 4 终止.

模式 9 ($t_7 \sim t_8$): 在 t_7 时刻, 电流开始流过 S_1 , L_{r1} 继续处于放电状态, $i_{L_{r1}}$ 从 I_0 继续正向线性减小. 当 $i_{L_{r1}}$ 减小到零时, 模式 9 终止.

模式 5 ($t_3 \sim t_4$): 负载电流 I_0 完全通过 S_4 和 D_3 所在支路续流. 电路处于稳定状态, 辅助谐振回路不工作. 此时 S_3 的端电压大小为零, S_1 端电压的大小为 U_d .

至此, 电路在 1 个开关周期的工作模式分析完毕, 然后电路返回模式 1, 进入下 1 个开关周期的工作.

模式 6 ($t_4 \sim t_5$): 在 t_4 时刻, 开通 S_{a1} . 在 S_{a1} 开通后, L_{r1} 处于被充电状态, $i_{L_{r1}}$ 从零开始正向线性增大. 在 t_5 时刻, $i_{L_{r1}}$ 正向增大到 I_0 时, 模式 6 终止.

3 实验验证

模式 7 ($t_5 \sim t_6$): 从 t_5 时刻开始, L_{r1} 与 C_1 、 C_3 同时进入谐振状态, L_{r1} 、 C_3 处于被充电状态, C_1 处于放电状态. $i_{L_{r1}}$ 从 I_0 开始正向增加, u_{C_1} 从零开始正向增加, u_{C_2} 从 U_d 开始正向减小. 当 u_{C_1} 正向减小到零, u_{C_2} 正向增大到 U_d , $i_{L_{r1}}$ 增大到正向最大值 I_2 时, 模式 7 终止.

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 $P_0 = 2\text{kW}$, 负载电阻 $R = 10\Omega$, 负载电感 $L = 1\text{mH}$, 直流电源电压 $U_d = 250\text{V}$, 最大负载电流 $I_{0\text{max}} = 20\text{A}$, 设定值 $I_b = 25\text{A}$, 主开关的开关频率 $f_c = 20\text{kHz}$, 输出频率 $f_0 = 50\text{Hz}$, 谐振电感 $L_{r1} = 4\mu\text{H}$, 谐振电容 $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 56\text{nF}$.

模式 8 ($t_6 \sim t_7$): 在 t_6 时刻, 关断 S_{a1} , 同时开通 S_1 . 从 t_6 时刻开始, D_1 开始流过电流, L_{r1} 处于放电状态, $i_{L_{r1}}$ 从 I_2 开始正向线性减小. 当 $i_{L_{r1}}$ 减小到 I_0 , D_1 截止时, 模式 8 终止.

图 4(a) 给出了在一个开关周期内, u_{C_1} 和 $i_{L_{r1}}$ 的实验波形, 可以看出实验波形与图 2 给出的特征工作波形的变化趋势高度相似, 证明了电路工作模式的分析是正确的. 图 4(b) 给出了样机输出的电流实验波形, 输出频率为 50Hz , 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(c) 和图 4(d) 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(c) 和图 4(d) 可以看出主开

关 S_1 开通前, u_{S_1} 已先降到零, 所以主开关 S_1 实现了零电压软开通; 当主开关 S_1 关断时, u_{S_1} 以较低的变化率缓慢上升, 所以主开关 S_1 实现了零电压软关断动作.

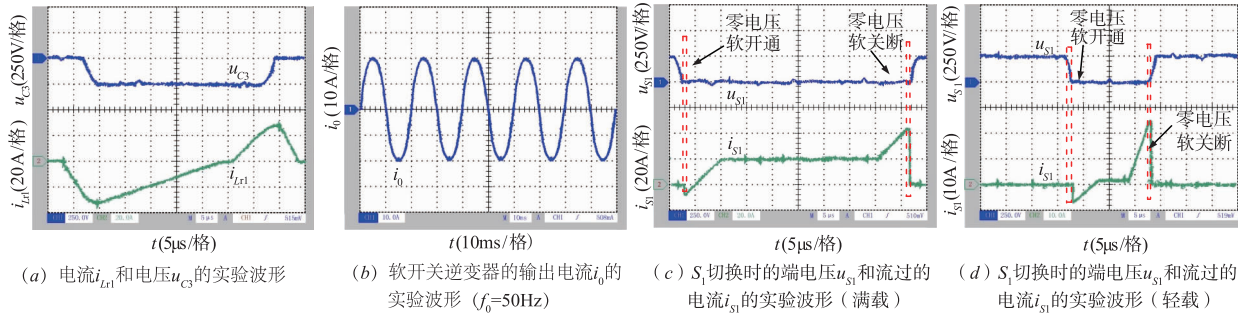


图4 实验波形

4 结论

设计出了一种单相全桥节能型谐振极逆变器, 其优势是辅助电路的控制逻辑简单, 而且无稳态环流流过辅助电路, 有利于优化效率; 主开关器件能实现零电压软切换, 有利于中小功率逆变器以常用的 MOSFET 作为开关器件. 实验验证得到以下结论: (1) 电路特征工作实验波形符合理论分析波形, 逆变器输出电流波形无显著畸变, 位于桥臂上的辅助电路对逆变器输出无明显不利影响; (2) 主开关处于零电压软切换.

参考文献

- [1] 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 Yuan-shao, WANG Tian-shi, et al. A single-phase full-bridge three-level energy-saving inverter [J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(12): 3068 – 3072. (in Chinese)

- [2] 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 Yuan-shao, WANG Tian-shi, 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)
- [3] 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 Yuan-shao, WANG Tian-shi, 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)
- [4] Tofoli Fernando Lessa, Gallo Carlos Alberto. Analysis, design, and implementation of soft-switching cells applied to the single-phase full-bridge inverter [J]. IET Power Electronics, 2016, 9(6): 1249 – 1258.

作者简介



王 强 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