

具有单辅助开关的高效率单相全桥谐振极逆变器

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: 为改善单相全桥逆变器的效率, 提出了一种高效率单相全桥谐振极软开关逆变器拓扑结构, 其辅助电路与逆变器桥臂相连, 且只含有1个辅助开关和少量无源器件. 在逆变器工作过程中, 主开关和辅助开关都能实现软切换, 通过降低开关损耗来实现逆变器高效率运行. 文中分析了电路工作过程, 实验结果表明开关器件实现了软开关, 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技术基础.

关键词: 逆变器; 辅助开关; 软开关; 效率; 谐振极

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2021)09-1863-04

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

DOI: 10.12263/DZXB.20180885

High-Efficiency Single-Phase Full Bridge Resonant Pole Inverter with Single Auxiliary Switch

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 high-efficiency single-phase full bridge resonant soft-switching inverter is proposed to improve efficiency of single-phase full bridge inverter. The auxiliary circuit is connected with the bridge arm of the inverter and contains only one auxiliary switch and a small number of passive devices. The main switches and auxiliary switch can achieve soft-switching in the working process of the inverter. High-efficiency operation of the inverter can also be achieved by reducing switching loss. In this paper, the working process of the circuit is analyzed. The experimental results indicate that the switching devices can achieve soft-switching, which lays a technical foundation for further research and development of a new practical single-phase full bridge soft-switching inverter with high performance.

Key words: inverter; auxiliary switch; soft-switching; efficiency; resonant pole

1 引言

传统的硬开关逆变器运行在高开关频率时, 逆变器效率会因为开关损耗的增大而受到不利影响, 同时逆变器还产生音频噪声. 通过在逆变器上设置辅助谐振电路, 开关器件可实现软切换, 能减小开关损耗, 并提高逆变器效率.

谐振极逆变器的辅助电路位于逆变器桥臂上, 直流电压利用率在换流过程不受影响. 谐振极逆变器已逐渐成为研究热点, 多种单相全桥谐振极逆变器拓扑结构已被提出, 但仍需优化, 以提高其实用性. 例如文献[1]中的辅助电路结构复杂, 无源器件较多, 辅助电

路包括6个辅助二极管, 3个谐振电感, 2个谐振电容和1个大容量储能电容; 文献[2,3]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.

本文提出了一种新型单相全桥谐振极软开关逆变器, 相比于相关文献提出的同类型逆变器, 具有以下优势: (1) 辅助电路仅含有1个辅助开关, 无源器件较少, 辅助电路硬件成本相对较低; (2) 位于逆变器上半桥臂的主开关器件和辅助电路中的辅助开关器件都能实现零电流软关断, 随着绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 在逆变器中的广泛应用,

收稿日期: 2018-10-15; 修回日期: 2019-05-06; 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)

实现零电流软关断可消除 IGBT 拖尾电流造成的关断损耗,能进一步降低开关损耗. 本文分析了电路的工作过程,最终通过实验验证了该逆变器的有效性.

2 电路工作过程分析

2.1 电路结构和软开关实现原理

本文提出的新型软开关逆变器拓扑如图 1 所示,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 1 个谐振电感 L_r , 2 个谐振电容 C_1

和 C_2 , 1 个辅助开关 S_a 及 4 个辅助二极管 $D_{r0} \sim D_{r3}$ 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 和负载电阻 R 组成. 负载电流方向为图 1 所示的正方向时,各开关器件的软开关实现原理如表 1 所示. 在分析电路工作过程时,作如下假设:(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 1 个开关周期中保持不变,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.

表 1 各开关器件的软开关实现原理

开关器件名称	软开关类型	软开关原理
S_1, S_2, S_3 和 S_a	零电流开通	利用 L_r 限制开关器件开通时的电流变化率。
S_1, S_2, S_4 和 S_a	零电流关断	在开关器件关断前,利用辅助电路使流过开关器件的电流先变为零。
S_3	零电压关断	利用 C_1 限制开关器件关断时的电压变化率。

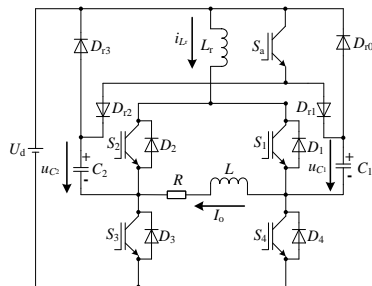


图 1 逆变器主电路

2.2 电路的工作流程

电路的特征工作波形如图 2 所示,各工作流程的等效电路图如图 3 所示.

流程 1 ($t \sim t_0$): 电流流过 S_1 和 S_3 , 此时 C_1 的端电压 u_{c1} 等于 $-U_d$, C_2 的端电压 u_{c2} 等于 U_d , 流过 L_r 的电流 i_{L_r} 等于 I_o , 电路处于稳态.

流程 2 ($t_0 \sim t_1$): 在 t_0 时刻, 开通 S_a . S_a 开通之后, L_r 与 C_1 进入谐振状态, L_r 和 C_1 都处于放电状态, i_{L_r} 从 I_o 正向减小, u_{c1} 从 $-U_d$ 反向减小. 在 t_1 时刻, 当 i_{L_r} 减小到零, u_{c1} 变化到 U_1 时, 流程 2 结束.

流程 3 ($t_1 \sim t_2$): 在 t_1 时刻, 关断 S_1 , 然后电流流过 D_1 , C_1 继续处于放电状态, L_r 处于被充电状态, i_{L_r} 从零反向增大, u_{c1} 从 U_1 反向减小. 当 u_{c1} 反向减小到零时, i_{L_r} 反向增大到本流程最大值 I_1 , i_{S_a} 正向增大到最大值 I_2 . 然后 C_1 处于被充电状态, L_r 处于放电状态, i_{L_r} 从 I_1 反向减小, u_{c1} 从零正向增大. 在 t_2 时刻, 当 i_{L_r} 反向减小到零, u_{c1} 正向增大到 U_2 时, 流程 3 结束.

流程 4 ($t_2 \sim t_3$): 在 t_2 时刻, L_r 与 C_1 结束谐振状态, U_d 完全通过 C_1 、 D_{r1} 和 S_a 所在的支路向负载供电, C_1 处于放电状态, u_{c1} 从 U_2 正向线性增加. 当 u_{c1} 增加到 U_d 时, D_{r3} 和 D_4 承受的电压为零, 流程 4 结束.

流程 5 ($t_3 \sim t_4$): 在 t_3 时刻, I_o 完全通过 C_2 、 D_{r3} 和 D_4 所

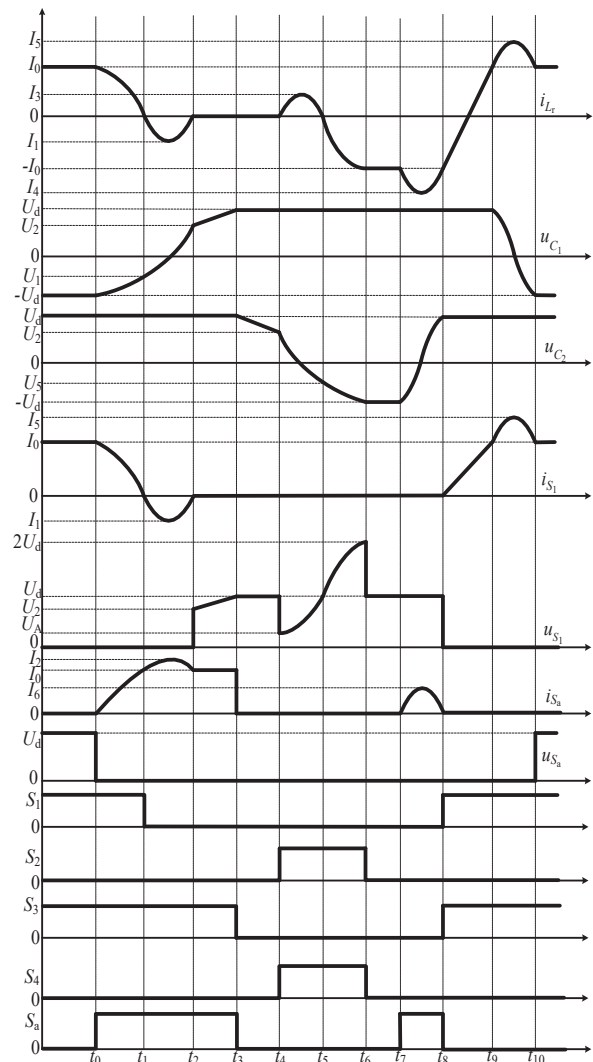


图 2 谐振换流期间的理论工作波形

在支路续流, 关断 S_a 和 S_3 . 从 t_3 时刻开始, C_2 处于放电状态, u_{c2} 从 U_d 正向线性减小, u_{S_a} 从零正向线性增大. 在 t_4

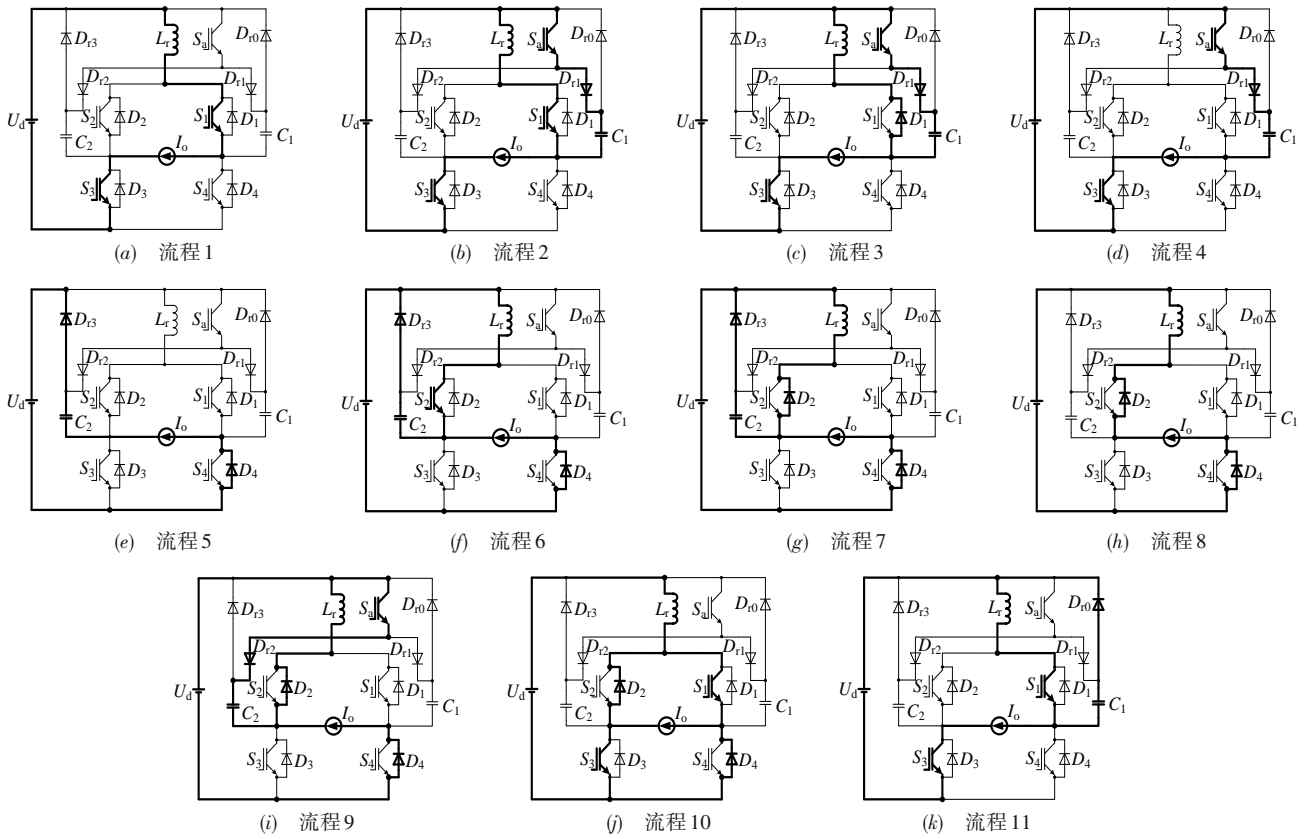


图3 各工作流程的等效电路图

时刻,同时开通 S_2 和 S_4 , u_{C_2} 正向减小到 U_4 , u_{S_1} 从 U_d 突变到 U_A , 流程 5 结束.

流程 6 ($t_4 \sim t_5$): 因为在 S_4 开通过程中, 没有电流直接流过 S_4 , 所以 S_4 的开通损耗为零. 从 t_4 时刻开始, L_r 与 C_2 进入谐振状态, C_2 处于放电状态, L_r 处于被充电状态, i_{L_r} 从零开始正向增大, u_{C_2} 从 U_4 开始正向减小. 当 u_{C_2} 正向减小到零时, i_{L_r} 正向增大到本流程最大值 I_3 , 然后 C_2 处于被充电的状态, L_r 处于放电的状态, i_{L_r} 从 I_3 正向减小, u_{C_2} 从零反向增大. 在 t_5 时刻, 当 i_{L_r} 正向减小到零, u_{C_2} 反向增大到 U_5 时, 流程 6 结束.

流程 7 ($t_5 \sim t_6$): 在 t_5 时刻, 电流开始流过 D_2 , L_r 与 C_2 都被充电, i_{L_r} 从零反向增大, u_{C_2} 从 U_5 反向增大. 在 t_6 时刻, 当 i_{L_r} 反向增大到与 I_0 相等, u_{C_2} 反向增大到 U_d 时, D_{r3} 截止, 流程 7 结束.

流程 8 ($t_6 \sim t_7$): 在 t_6 时刻, 同时关断 S_2 和 S_4 . 从 t_6 时刻开始, 负载电流完全通过 L_r , D_2 和 D_4 所在的支路续流, $i_{L_r} = -I_0$, $u_{C_2} = -U_d$, 电路处于稳态.

流程 9 ($t_7 \sim t_8$): 在 t_7 时刻, 开通 S_a . S_a 开通之后, L_r 与 C_2 进入谐振状态, L_r 处于被充电的状态, i_{L_r} 从 $-I_0$ 反向增大, u_{C_2} 从 $-U_d$ 反向减小. 当 u_{C_2} 反向减小到零时, i_{L_r} 反向增大到最大值 I_4 , i_{S_a} 达到本流程最大值 I_6 . 然后 C_2 处于被充电状态, L_r 处于放电状态, i_{L_r} 从 I_4 反向减小, u_{C_2} 从零正向增大. 在 t_8 时刻, 同时开通 S_1 和 S_3 , 当 i_{L_r} 反向减小到

$-I_0$, u_{C_2} 正向增大到 U_d 时, 流程 9 结束.

流程 10 ($t_8 \sim t_9$): 从 t_8 时刻开始, L_r 承受电压与直流电源电压相等, i_{L_r} 从 $-I_0$ 正向线性增大. 在 t_9 时刻, 当 i_{L_r} 正向变化到 I_0 时, D_2 和 D_4 截止, 流程 10 结束.

流程 11 ($t_9 \sim t_{10}$): 在 t_9 时刻, L_r 与 C_1 处于谐振状态, 电流流过 D_{r0} , C_1 处于放电状态, L_r 处于被充电状态, i_{L_r} 从 I_0 反向增大, u_{C_1} 从 U_d 反向减小. 当 u_{C_1} 反向减小到零时, i_{L_r} 反向增大到最大值 I_5 , 同时 i_{S_1} 也增加到正向最大值. 然后 C_1 处于被充电的状态, L_r 处于反向放电的状态, i_{L_r} 从 I_5 反向减小, u_{C_1} 从零反向增大. 在 t_{10} 时刻, 当 i_{L_r} 反向减小到 I_0 , u_{C_1} 反向增大到 $-U_d$ 时, D_{r0} 截止, 流程 11 结束.

3 实验验证

样机参数如下: 额定输出功率 $P_0 = 3\text{kW}$, 负载电阻 $R = 15\Omega$, 负载电感 $L = 1\text{mH}$, 最大负载电流 $I_{\text{omax}} = 20\text{A}$, 直流电源电压 $U_d = 400\text{V}$, 开关频率 $f_c = 20\text{kHz}$, 输出频率 $f_o = 50\text{Hz}$, 谐振电感 $L_r = 9\mu\text{H}$, 谐振电容 $C_1 = C_2 = 33\text{nF}$, 辅助开关的触发脉冲占空比 $\rho_s = 0.098$.

在输出频率为 50Hz 时的样机输出电流的动态实验波形分别如图 4(a) 所示, 输出电流波形的正弦度较好, 使用频谱分析仪对逆变器的输出电流进行了测试, 得到输出频率为 50Hz 时的总谐波失真为 2.4% , 因此并没有因为增加辅助电路而影响逆变器的正常运

行和输出电流波形的质量. 在满载和轻载时, S_1 动作时的端电压 u_{S_1} 和流过的电流 i_{S_1} 的实验波形分别如图 4(b) 和图 4(c) 所示, 其中 i_{S_1} 在零位以下变化时, 表示电流流过 D_1 . 图 4(b) 和图 4(c) 显示在开关开通时刻, i_{S_1} 上升的速度被抑制, 所以轻载和满载时都实现了 S_1 的零电流软开通; 图 4(b) 和图 4(c) 显示 u_{S_1} 增大之前, i_{S_1}

已经等于零, 所以轻载和满载时都实现了 S_1 的零电流软关断. S_a 动作时的端电压 u_{S_a} 和电流 i_{S_a} 的实验波形如图 4(d) 所示. 在图 4(d) 中, S_a 开通时, i_{S_a} 以较低变化率正向增大, 实现了 S_a 零电流软开通; i_{S_a} 变为零之后, u_{S_a} 没有增大, 且保持为零, 所以实现了 S_a 零电流软关断.

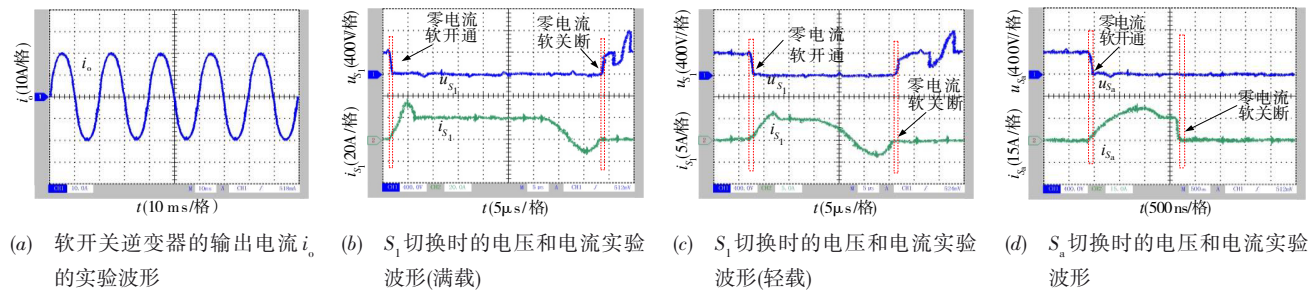


图 4 实验波形

4 结论

设计出了一种新型单相全桥谐振极软开关逆变器, 其优势是辅助电路只有 1 个辅助开关, 无源器件较少, 辅助电路硬件成本较低且控制简单, 辅助开关和上半桥臂的主开关都实现了零电流软关断, 当以 IGBT 作为开关器件时, 可进一步降低开关损耗. 经实验验证得到的结论如下: (1) 在换流过程中, 主开关和辅助开关都能完成软切换; (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. 本文的研究成果为提高单相全桥谐振极软开关逆变器的性能和实用性奠定了基础.

参考文献

- [1] 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)
- [2] 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)

- [3] 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 Yuanshao, Wang Tianshi, 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)

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