

具有软开关功能的三相谐振直流环节逆变器

王 强^{1,2}, 郭国先^{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: 为实现三相逆变器节能运行, 提出一种具有软开关功能的三相谐振直流环节逆变器. 直流侧的辅助谐振电路将参与换流过程, 使直流环节电压在桥臂上的主开关动作之前变化到零, 主开关能完成零电压软切换动作, 通过降低开关损耗来实现逆变器节能运行. 分析了1个开关周期内的电路工作流程. 实验结果显示开关器件动作时处于软切换. 因此, 该辅助谐振电路结构对于研发节能型三相逆变器具有参考价值.

关键词: 节能; 逆变器; 辅助谐振电路; 软开关; 开关损耗

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)09-1994-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.09.025

Three-Phase Resonant DC Link Inverter with Soft-Switching Function

WANG Qiang^{1,2}, GUO Guo-xiang^{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: In order to realize the energy-saving operation of three-phase inverter, a novel three-phase resonant DC (Direct Current) link inverter with soft-switching function is proposed. The auxiliary resonant circuit on the DC side can participate in the commutation process, making the DC link voltage change to zero before the main switches act on the bridge arm. Therefore, the main switches can achieve the zero-voltage soft-switching action, and realize the energy-saving operation of the inverter by reducing the switching loss. The workflows of the circuit are analyzed. The experimental results show that the switching devices are in the state of soft switching. The structure of the auxiliary resonant circuit has reference value for research and development of an energy-saving three-phase inverter.

Key words: energy-saving; inverter; auxiliary resonant circuit; soft-switching; switching loss

1 引言

随着科学技术不断发展进步, 工业生产对逆变器的要求日益提高, 硬开关逆变器已经无法满足现代化的生产需求, 软开关逆变器相比传统硬开关逆变器的优势就体现出来了. 软开关逆变器可以克服硬开关逆变器的开关器件端电压和流过其电流的交叉重叠现象, 同时也会消除硬开关因为开关频率提高而产生的开关损耗和较高的器件发热量. 软开关逆变器可以使开关器件实现软切换, 减小了较高电压和电流变化的电磁干扰, 降低了开关损耗, 提高了电路的效率, 节约了电能.

软开关逆变器可分为谐振极逆变器和谐振直流环节逆变器. 在近些年, 已有多项谐振直流环节逆变器拓扑结构被提出, 促进了谐振直流环节逆变器的推广和

应用, 但是仍然需要在逆变器控制方面进一步优化. 文献[1~4]提出的拓扑结构在换流过程中将桥臂切换到直通状态来给谐振电感充电, 以确保谐振电感储存足够的电能使直流环节电压从零回升到稳态值, 但是桥臂处于直通状态的时间需要精确控制, 否则极易造成直流电源短路, 另外, 逆变器常采用空间电压矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)方法, 工作状态中不存在桥臂直通, 因此, 为使桥臂处于短时间的直通, 需要对传统的 SVPWM 方法进行改变, 导致该软开关逆变器控制复杂化, 使传统成熟的 SVPWM 方法不能直接应用到该软开关逆变器.

本文提出了一种新型谐振直流环节软开关逆变器, 在逆变器控制方面的优势是逆变器工作过程中不需要桥臂处于直通, 可以直接使用成熟的 SVPWM 方

收稿日期: 2019-04-08; 修回日期: 2019-05-06; 责任编辑: 覃怀银

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)

法,不会导致逆变器主开关的控制复杂化.文中将详细分析逆变器的工作流程,最后通过实验来验证该软开关逆变器的优势.

2 电路拓扑结构和工作流程分析

2.1 电路拓扑结构

图 1 给出了本文提出的谐振直流环节逆变器主电路.主电路包含直流电源,位于直流环节的辅助谐振电路以及三相逆变电路.辅助开关器件 S_{r1} 和 S_{r2} ,辅助二极管 D_{r1} 、 D_{r2} 、 D_{s1} 、 D_{s2} 和 D_{s3} ,耦合电感 L_{r1} 、 L_{r2} 和谐振电感 L_{r3} ,以及谐振电容 C_r 组成了辅助谐振电路.当辅助电路发生谐振时,能使逆变器输入端的直流母线电压变化到零,三相逆变电路的主开关能完成零电压软开通和关断,使开关损耗降低.

为了简化分析,可以假定:(1)各器件都为理想器件;(2)负载电感值可以认为足够大,逆变器输出端电流 I_0 为恒定值,逆变器输出端负载可以看作是恒流源;(3)开关器件 S_{IN} 和续流二极管 D_{IN} 组成了三相逆变电路的等效电路.逆变器等效电路及物理量的参考正方向如图 2 所示.

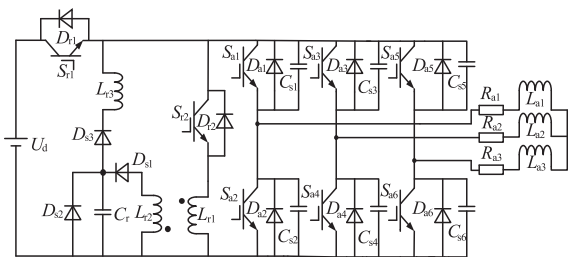


图1 具有软开关功能的三相谐振直流环节逆变器主电路

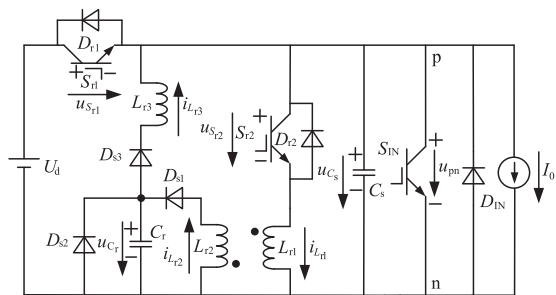


图2 具有软开关功能的三相谐振直流环节逆变器等效电路

2.2 工作流程

10 个工作流程被包含在主开关的每个开关周期内.图 3 给出了电路的特征波形,图 4 给出了各工作流程等效电路图.

流程 1 ($t \sim t_0$): S_{r1} 处于导通状态,直流电源 U_d 向负载供电,电路处于稳态.

流程 2 ($t_0 \sim t_1$): 在 t_0 时刻,开通 S_{r2} , L_{r1} 限制了 S_{r2} 发生开通动作时电流上升速度,因此 S_{r2} 在开通时实现了

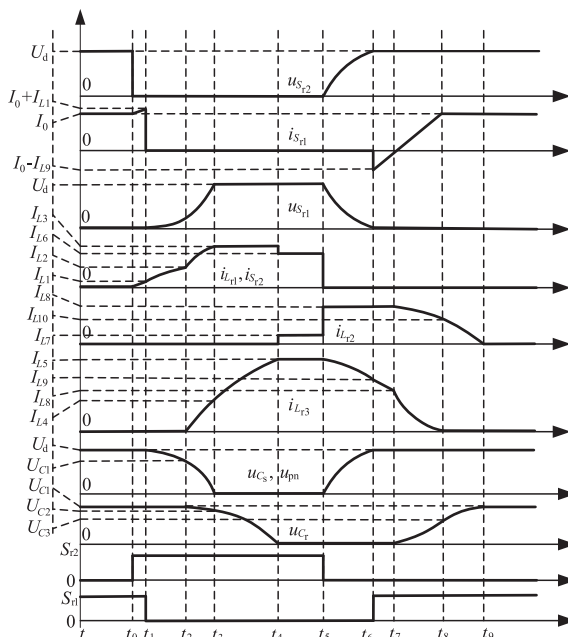


图3 谐振换流期间的理论工作波形

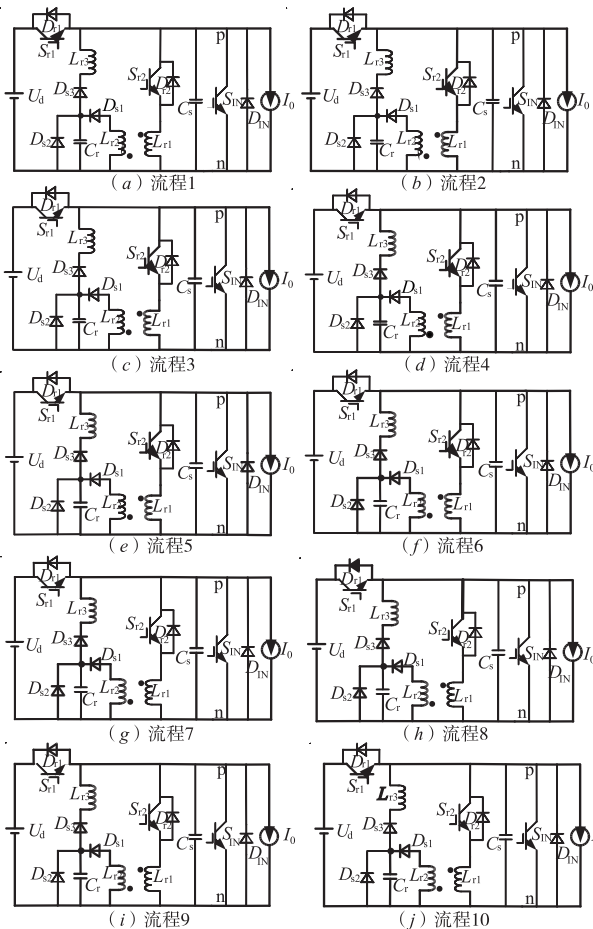


图4 各工作流程的等效电路图

零电流软开通. S_{r2} 开通以后, L_{r1} 被充电, i_{Lr1} 从零开始正向线性增大. 在 t_1 时刻, 当 $i_{Lr1} = I_{Lr1}$ 时, 流程 2 结束.

流程3($t_1 \sim t_2$):在 t_1 时刻,关断 S_{r1} , C_s 限制了 S_{r1} 发生关断动作时电压上升速度,因此 S_{r1} 在关断时实现了零电压软关断。 S_{r1} 关断以后, L_{r1} 和 C_s 进入谐振状态, C_s 放电, L_{r1} 被充电, u_{c_s} 从 U_d 开始正向减小, $i_{L_{r1}}$ 从 I_{L_r} 继续正向增大。在 t_2 时刻,当 u_{c_s} 减小到 U_{c_r} 时,流程3结束。

流程4($t_2 \sim t_3$):在 t_2 时刻, D_{s3} 自然导通, C_s 、 C_r 、 L_{r1} 和 L_{r3} 进入谐振状态, C_s 和 C_r 放电, L_{r1} 和 L_{r3} 被充电, u_{c_s} 和 u_{c_r} 都从 U_{c_r} 开始正向减小, $i_{L_{r1}}$ 从 I_{L_r} 继续正向增大, $i_{L_{r3}}$ 从零开始正向增大。在 t_3 时刻,当 u_{c_s} 减小到零时,流程4结束。

流程5($t_3 \sim t_4$):在 t_3 时刻, L_{r3} 和 C_r 进入谐振状态, C_r 放电, L_{r3} 被充电, u_{c_r} 从 U_{c_r} 继续正向减小, $i_{L_{r3}}$ 从 I_{L_r} 继续正向增大。同时等效二极管 D_{IN} 自然导通, $i_{L_{r1}}$ 为 I_{L_3} 保持恒定。在 t_4 时刻,当 u_{c_r} 减小到零时,流程5结束。

流程6($t_4 \sim t_5$):在 t_4 时刻,等效二极管 D_{IN} 自然关断, D_{s1} 和 D_{s2} 自然导通, $i_{L_{r1}}$ 从 I_{L_r} 快速减小到 I_{L_6} , $i_{L_{r2}}$ 从零快速增大到 I_{L_7} ,然后 $i_{L_{r1}}$ 和 $i_{L_{r2}}$ 保持恒定。 $i_{L_{r3}}$ 为 I_{L_5} 保持恒定。同时在该流程中,直流母线电压 u_{pn} 等于零,逆变器的主开关能完成零电压软开通和关断。

流程7($t_5 \sim t_6$):在 t_5 时刻,关断 S_{r2} , C_s 限制了 S_{r2} 发生关断动作时电压上升速度,因此 S_{r2} 在关断时实现了零电压软关断。 $i_{L_{r1}}$ 从 I_{L_6} 快速减小到零, $i_{L_{r2}}$ 从 I_{L_7} 快速增大到 I_{L_8} ,然后 $i_{L_{r2}}$ 保持恒定。 S_{r2} 关断以后, L_{r3} 和 C_s 进入谐振状态, L_{r3} 放电, C_s 被充电, $i_{L_{r3}}$ 从 I_{L_5} 开始正向减小, u_{c_s} 从零开始正向增大。在 t_6 时刻,当 u_{c_s} 增大到 U_d 时,流程7结束。

流程8($t_6 \sim t_7$):在 t_6 时刻, D_{r1} 自然导通, S_{r1} 的端电压等于零,此时开通 S_{r1} ,因此 S_{r1} 开通时实现了零电压软开通。 $i_{L_{r2}}$ 为 I_{L_8} 保持恒定, $i_{L_{r3}}$ 从 I_{L_9} 继续正向减小, L_{r3} 向电源回馈电能,同时还向负载供电。在 t_7 时刻,当 $i_{L_{r3}}$ 减小到 I_{L_8} 时,流程8结束。

流程9($t_7 \sim t_8$):在 t_7 时刻, L_{r2} 、 L_{r3} 和 C_r 进入谐振状态, L_{r2} 和 L_{r3} 放电, C_r 被充电, $i_{L_{r2}}$ 和 $i_{L_{r3}}$ 从 I_{L_8} 开始正向减小, u_{c_r} 从零开始正向增大。当 $i_{L_{r3}}$ 减小到 I_0 时, D_{r1} 自然关断。在 t_8 时刻,当 $i_{L_{r3}}$ 减小到零时,流程9结束。

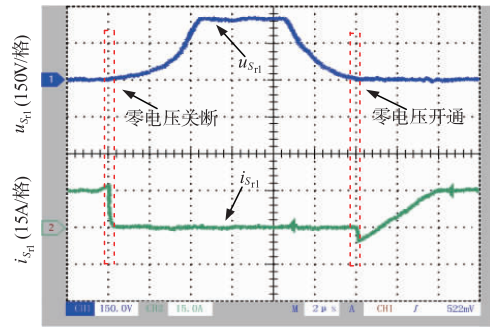
流程10($t_8 \sim t_9$):在 t_8 时刻, D_{s3} 自然关断, S_{r1} 处于导通状态,直流电源 U_d 向负载供电, L_{r2} 和 C_r 处于谐振状态, L_{r2} 放电, C_r 被充电, $i_{L_{r2}}$ 从 $I_{L_{10}}$ 继续正向减小, u_{c_r} 从 U_{c_3} 继续正向增大。在 t_9 时刻,当 $i_{L_{r2}}$ 减小到零时,流程10结束。

3 实验验证

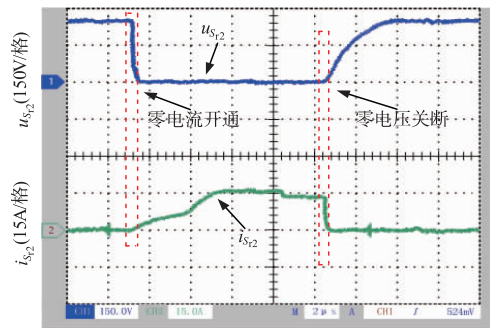
根据图1制作了实验样机,参数如下:额定输出功率 $P_0 = 2.5\text{kW}$,直流电源电压 $U_d = 250\text{V}$,负载电感 $L_{a1} = L_{a2} = L_{a3} = 1\text{mH}$,负载电阻 $R_{a1} = R_{a2} = R_{a3} = 7.5\Omega$,缓冲电容 $C_{s1} = C_{s2} = C_{s3} = C_{s4} = C_{s5} = C_{s6} = 15\text{nF}$,等效电容 C_s

$= 3C_{s1} = 45\text{nF}$,最大负载电流为 $I_{0\text{max}} = 15\text{A}$,辅助开关 S_{r2} 的触发脉冲占空比 $\rho_{S_{r2}}$ 为0.56,谐振电感 $L_{r1} = L_{r2} = 6\mu\text{H}$, $L_{r3} = 14\mu\text{H}$,谐振电容 $C_r = 0.33\mu\text{F}$,开关频率 $f_c = 20\text{kHz}$ 。

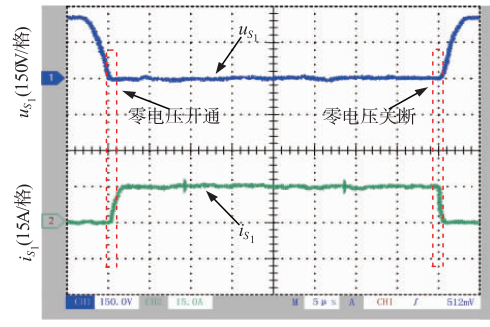
辅助开关 S_{r1} 发生切换动作时电压 $u_{S_{r1}}$ 和电流 $i_{S_{r1}}$



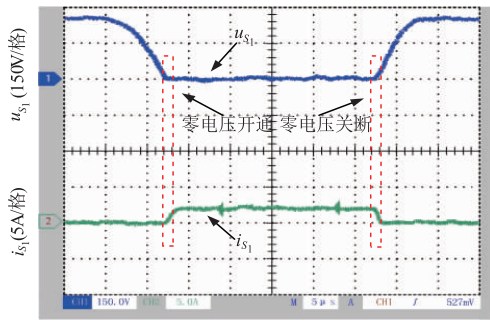
(a) S_{r1} 切换时的电压和电流实验波形



(b) S_{r2} 切换时的电压和电流实验波形



(c) S_{r1} 切换时的电压和电流实验波形 (满载)



(d) S_{r1} 切换时的电压和电流实验波形 (轻载)

图5 实验波形

的实验波形如图 5(a) 所示,由波形图得出 S_{r1} 发生开通动作时,在电流 $i_{s_{r1}}$ 反向增大前,电压 $u_{s_{r1}}$ 已经变化到零, S_{r1} 开通时处于零电压软开通状态;同时可以得出 S_{r1} 发生关断动作时,电压 $u_{s_{r1}}$ 的变化率较低,开关 S_{r1} 关断时处于零电压软关断状态. 辅助开关 S_{r2} 发生切换动作时电压 $u_{s_{r2}}$ 和电流 $i_{s_{r2}}$ 的实验波形如图 5(b) 所示,由波形图得出 S_{r2} 发生开通动作时,电流 $i_{s_{r2}}$ 的变化率较低,开关 S_{r2} 开通时处于零电流软开通状态;同时可以得出 S_{r2} 发生关断动作时,电压 $u_{s_{r2}}$ 的变化率较低,开关 S_{r2} 关断时处于零电压软关断状态. 图 5(c) 和图 5(d) 分别给出了在满载和轻载时的主开关 S_1 动作时承受的电压 u_{s_1} 和电流 i_{s_1} 的实验波形,由图 5(c) 和图 5(d) 波形图得出主开关 S_1 发生开通动作时,电流 i_{s_1} 增大前,电压 u_{s_1} 已经变化到零,开关 S_1 开通时处于零电压软开通状态;由图 5(c) 和图 5(d) 同时可以得出 S_1 发生关断动作时, u_{s_1} 以较低的变化率增大,主开关 S_1 关断时处于零电压软关断状态.

4 结论

本文根据相关文献已提出的谐振直流环节逆变器存在的控制问题,设计了一种新型辅助电路结构,使谐振直流环节逆变器的控制策略得到优化,有利于谐振直流环节逆变器的推广和应用. 通过实验验证得到结论:主开关和辅助开关动作时都处于软切换.

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

参考文献

- [1] 王强,邢岩. 具有并联谐振直流环节的软开关电压源逆变器[J]. 电子学报,2013,41(11):2317-2320.
Wang Qiang, Xing Yan. Soft switching voltage source inverter with parallel resonant DC link[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(11):2317-2320. (in Chinese)
- [2] 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)
- [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-assisted commutation[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(10):2133-2136. (in Chinese)
- [4] Chen Yenan, Xu Dehong, Xi Jiangbei, et al. A ZVS grid-connected full-bridge inverter with a novel ZVS SPWM scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5):3626-3638.



郭国先 男,1993 年 10 月出生于河南省滑县,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: 2907267998@qq.com