

新型三相低能耗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: 为实现三相逆变器的高效率运行,提出了一种新型三相低能耗谐振直流环节逆变器,利用设置在逆变器直流环节的辅助谐振电路使直流母线电压在每个开关周期都形成零状态时,主开关能实现零电压软开通动作和零电流软关断动作,完成了无损耗切换. 说明了一个开关周期内的电路工作状态,在2.5 kW三相样机上的实验结果表明开关器件完成了软切换. 因此,该新型拓扑结构对于改善逆变器运行效率具有重要意义.

关键词: 逆变器; 直流环节; 谐振; 零电压开通; 零电流关断

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)09-2295-04

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

DOI: 10.12263/DZXB.20181043

A Novel Three-Phase Resonant DC Link Inverter with Low Energy Consumption

WANG Qiang^{1,2}, GUO Guo-xian^{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 novel three-phase resonant DC link inverter with low energy consumption is proposed to achieve the high efficiency operation of the inverter. When the DC-bus voltage forms a zero-state in each switching cycle via the auxiliary resonant circuit set in the DC link of the inverter, the main switch can achieve zero-voltage turn on and zero-current turn off. The working state of the circuit in a switching period is explained. The experimental results on the three-phase prototype of 2.5 kW show that the switching devices achieve the soft switching. Therefore, the novel topology is significant for improving the efficiency of the inverter.

Key words: inverter; DC link; resonance; zero-voltage turn on; zero-current turn off

1 引言

由于硬开关逆变器在开关切换期间会产生电压和电流的交叉重叠现象,导致开关器件产生功率损耗,同时随着开关频率不断增高,其开关损耗和器件发热量逐渐增大. 在现代电力电子技术中软开关逆变器应用越来越广泛,软开关逆变器可以实现高频化,在开关切换期间可以实现软切换,降低了开关损耗.

软开关逆变器包含谐振极逆变器^[1]和谐振直流环节逆变器^[2-5],谐振直流环节逆变器具有辅助电路结构简单,辅助器件较少,硬件成本低等优点. 因此,科研人员近些年已提出了多种谐振直流环节逆变器拓扑结

构,但是仍需改进. 在辅助电路的控制方面,文献[2~4]的辅助电路在控制辅助开关的切换时,需要实时监控流过谐振电感的电流是否达到阈值,而且该阈值随负载电流的变化而变化,导致辅助电路控制变复杂;在实现软开关的类型方面,文献[2~5]的逆变器桥臂上的主开关和直流母线上串联的辅助开关都能实现零电压软开通和零电压软关断,当三相逆变器应用在较大功率场合时,常以绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)作为开关器件,IGBT在关断时存在的拖尾电流会导致关断损耗,所以实现零电流软关断对于以IGBT作为开关器件的逆变器更有意义,但是文献[2~5]的逆变器主开关和直流母线上的辅助开关无

收稿日期:2018-11-28;修回日期:2019-01-29;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)

法实现零电流软关断。

文中提出了新型三相低能耗谐振直流环节软开关逆变器,其具有如下优点:(1)辅助电路在控制过程中,并联支路上的辅助开关开通后直接触发谐振,控制辅助开关的切换时,不需要实时监测谐振电流的变化;(2)逆变器主开关没有并联缓冲电容,主开关和串联在直流母线上的辅助开关既能完成零电压软开通,又能完成零电流软关断,真正实现了开关损耗等于零.本文详细分析了1个开关周期内的电路工作状态,最终在一台2.5 kW的三相实验样机上验证了该逆变器的有效性.

2 电路拓扑结构和工作流程

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} 和 D_{r2} ,耦合谐振电感 L_{r1} 和 L_{r2} 以及谐振电容 C_{r1} 和 C_{r2} 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零电流软关断,使开关损耗降低.

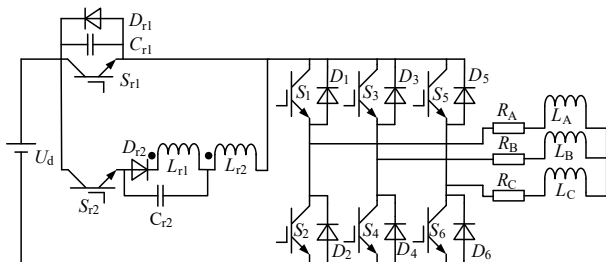


图1 新型三相低能耗谐振直流环节逆变器主电路

2.2 工作流程

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,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.

(1) 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.

(2) 流程2($t_0 \sim t_1$):在 t_0 时刻,开通 S_{r2} , L_{r2} 限制了 S_{r2} 发生开通动作时电流上升速度,因此 S_{r2} 在开通时实现了零电流软开通. S_{r2} 开通以后, L_{r2} 和 C_{r2} 进入谐振状态, L_{r2} 被充电, C_{r2} 放电,流过 L_{r2} 的电流 i_{Lr2} 从零开始正向增大, C_{r2} 端电压 $u_{C_{r2}}$ 从 U_1 开始正向减小.在 t_1 时刻,当 i_{Lr2}

正向增大到与负载电流 I_0 相等, $u_{C_{r2}}$ 正向减小到 U_2 时,流过 S_{r1} 的电流变化到零,流程2结束.

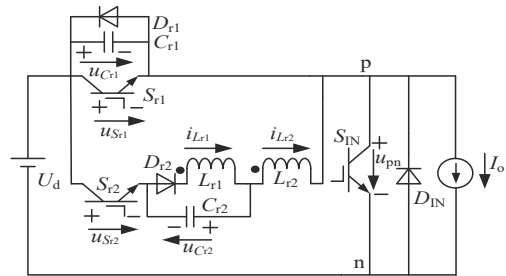


图2 逆变器等效电路

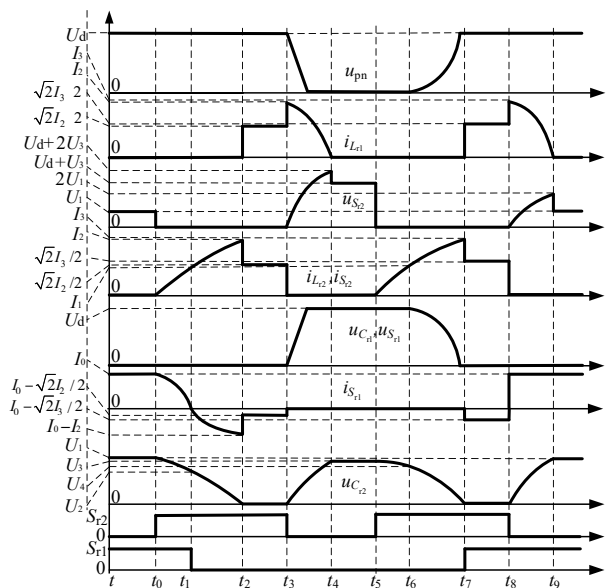


图3 谐振换流期间的理论工作波形

(3) 流程3($t_1 \sim t_2$):在 t_1 时刻,关断 S_{r1} ,因为 S_{r1} 发生关断动作时,流过 S_{r1} 的电流已经等于零,所以 S_{r1} 在关断时实现了零电流软关断. S_{r1} 关断以后, L_{r2} 和 C_{r2} 继续处于谐振状态, C_{r2} 继续放电, L_{r2} 继续被充电, $u_{C_{r2}}$ 从 U_2 开始继续正向减小, i_{Lr2} 从 I_1 开始继续正向增大,电流开始流过 D_{r1} .在 t_2 时刻, $u_{C_{r2}}$ 减小到零, i_{Lr2} 增大到 I_2 时,流程3结束.

(4) 流程4($t_2 \sim t_3$):在 t_2 时刻, $u_{C_{r2}}$ 减小到零,电流开始流过 D_{r2} ,谐振过程结束,电流开始同时流过 L_{r1} 和 L_{r2} , i_{Lr1} 从零快速增大到 $\sqrt{2} I_2/2$, i_{Lr2} 从 I_2 快速减小到 $\sqrt{2} I_2/2$,然后 i_{Lr1} 和 i_{Lr2} 保持恒定,电路处于稳定运行状态.

(5) 流程5($t_3 \sim t_4$):在 t_3 时刻,关断 S_{r2} ,因为 C_{r1} 和 C_{r2} 共同限制了 S_{r2} 发生关断动作时电压上升速度,所以 S_{r2} 在关断时实现了零电压软关断.同时在 t_3 时刻, i_{Lr1} 从 $\sqrt{2} I_2/2$ 快速增大到 I_2 , i_{Lr2} 从 $\sqrt{2} I_2/2$ 快速减小到零.在 t_3 时刻开始,负载电流 I_0 开始流过 C_{r1} ,同时 L_{r1} 和 C_{r2} 开始进入谐振状态, C_{r1} 和 C_{r2} 被充电, L_{r1} 放电, $u_{C_{r1}}$ 从零开始正

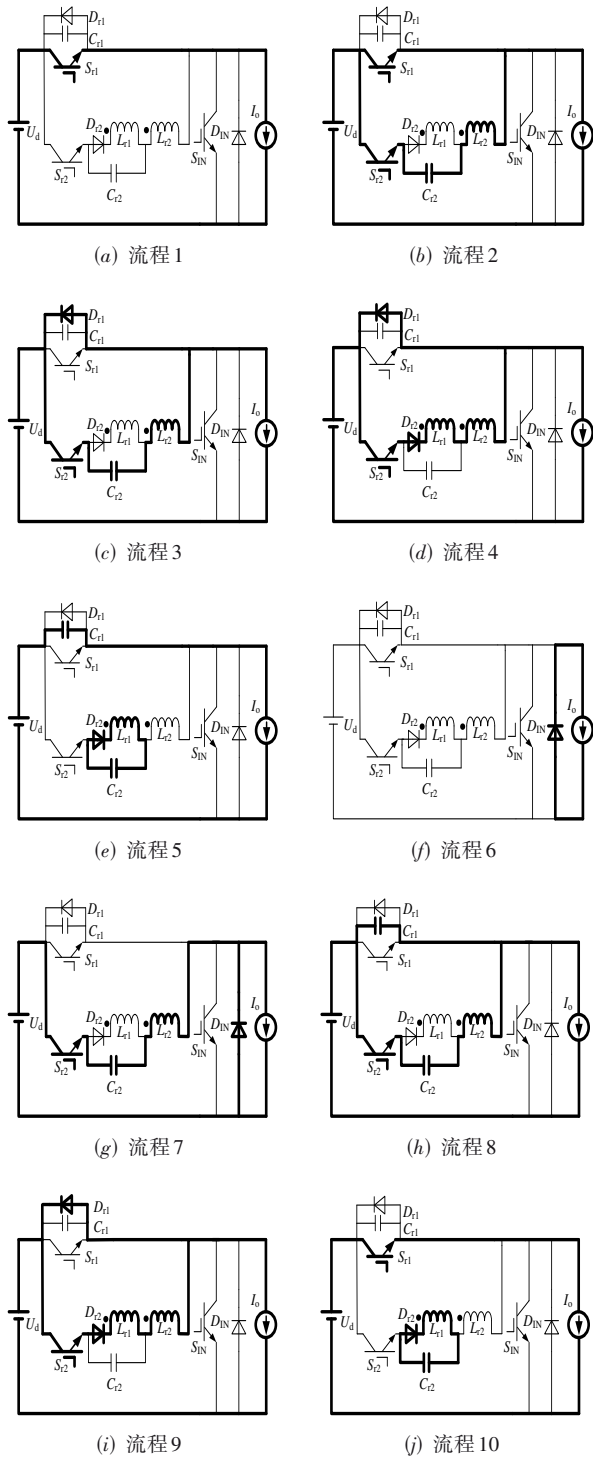


图 4 各工作流程的等效电路图

向线性增大, $u_{C_{r2}}$ 从零开始正向非线性增大, $i_{L_{r1}}$ 从 I_2 开始减小. $u_{C_{r1}}$ 线性增大到 U_d 时, 直流母线电压 u_{pn} 线性减小到零. 在 t_4 时刻, $u_{C_{r1}}$ 等于 U_d , $u_{C_{r2}}$ 增大到 U_3 , $i_{L_{r1}}$ 减小到零时, 谐振结束, 流程 5 结束.

(6) 流程 6 ($t_4 \sim t_5$): 在该流程中, 直流母线电压 u_{pn}

等于零, 直流电源不向负载供电, 负载电流 I_0 通过等效二极管 D_{1N} 续流. 在该流程中, 逆变器的主开关能完成零电压软开通和零电流软关断.

(7) 流程 7 ($t_5 \sim t_6$): 在 t_5 时刻, 开通 S_{r2} , 因为 L_{r2} 限制了 S_{r2} 发生开通动作时电流上升速度, 所以 S_{r2} 在开通时实现了零电流软开通. S_{r2} 开通以后, L_{r2} 和 C_{r2} 进入谐振状态, C_{r2} 放电, L_{r2} 被充电, $u_{C_{r2}}$ 从 U_3 开始逐渐减小, $i_{L_{r2}}$ 从零开始逐渐增大. 在 t_6 时刻, $u_{C_{r2}}$ 减小到 U_4 , $i_{L_{r2}}$ 增大到与 I_0 相等时, 流程 7 结束.

(8) 流程 8 ($t_6 \sim t_7$): 在 t_6 时刻, 等效二极管 D_{1N} 自然关断, L_{r2} , C_{r1} 和 C_{r2} 进入谐振状态, C_{r1} 和 C_{r2} 放电, L_{r2} 被充电, $u_{C_{r1}}$ 从 U_d 开始减小, $u_{C_{r2}}$ 从 U_5 开始减小, $i_{L_{r2}}$ 从 I_0 开始继续增大. 在 t_7 时刻, $u_{C_{r1}}$ 和 $u_{C_{r2}}$ 都减小到零, $i_{L_{r2}}$ 增大到 I_3 时, 流程 8 结束.

(9) 流程 9 ($t_7 \sim t_8$): 在 t_7 时刻, 开通 S_{r1} , 因为在 S_{r1} 开通前, S_{r1} 的端电压已经等于零, 所以 S_{r1} 在开通时处于零电压软开通状态. 同时 $u_{C_{r2}}$ 减小到零, 电流开始流过 D_{r2} , 谐振过程结束, 电流开始同时流过 L_{r1} 和 L_{r2} , $i_{L_{r1}}$ 从零快速增大到 $\sqrt{2} I_3/2$, $i_{L_{r2}}$ 从 I_3 快速减小到 $\sqrt{2} I_3/2$, 然后 $i_{L_{r1}}$ 和 $i_{L_{r2}}$ 保持恒定, 电路处于稳定运行状态.

(10) 流程 10 ($t_8 \sim t_9$): 在 t_8 时刻, 关断 S_{r2} , 因为 C_{r2} 限制了开关 S_{r2} 发生关断动作时电压上升速度, 所以 S_{r2} 在关断时实现了零电压软关断. 同时在 t_8 时刻, $i_{L_{r1}}$ 从 $\sqrt{2} I_3/2$ 快速增大到 I_3 , $i_{L_{r2}}$ 从 $\sqrt{2} I_3/2$ 快速减小到零. 从 t_8 时刻开始, 直流电源通过开通的 S_{r1} 向负载供电, 同时 L_{r1} 和 C_{r2} 进入谐振状态, L_{r1} 放电, C_{r2} 被充电, $i_{L_{r1}}$ 从 I_3 开始正向减小, $u_{C_{r2}}$ 从零开始正向增大. 在 t_9 时刻, $i_{L_{r1}}$ 正向减小到零, $u_{C_{r2}}$ 正向增大到 U_1 时, 流程 10 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, 进入下一个开关周期的工作.

3 实验结果

按照图 1 所示主电路, 完成了三相实验样机的研制, 本文采用空间电压矢量脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 方法作为控制策略. 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 $L_A=L_B=L_C=1 \text{ mH}$, 负载电阻 $R_A=R_B=R_C=7.5 \Omega$, 最大负载电流为 $I_{\text{omax}}=15 \text{ A}$, 最小负载电流 $I_{\text{omin}}=2 \text{ A}$, 输出相电压有效值 $U_1=80 \text{ V}$, 辅助开关 S_{r2} 的触发脉冲占空比 $\rho_{S_{r2}}$ 为 0.155, 谐振电感 $L_{r1}=L_{r2}=7 \mu\text{H}$, 谐振电容 $C_{r1}=39 \text{ nF}$, $C_{r2}=0.22 \mu\text{F}$, 开关频率 $f_s=20 \text{ kHz}$.

相关的实验波形如图 5 所示, 实验波形中的电压和电流取的正方向与图 2 中的标注一致. 辅助开关 S_{r1} 发生切换动作时电压 $u_{S_{r1}}$ 和电流 $i_{S_{r1}}$ 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 $i_{S_{r1}}$ 增大前, 电压 $u_{S_{r1}}$ 已经变化到零, 开关 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,在电压 $u_{s_{r1}}$ 增大前,电流 $i_{s_{r1}}$ 已经变化到零,开关 S_{r1} 关断时处于零电流软关断状态. 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,主开关 S_1 开通时处于零电压软开通状态;由图5(c)和图5(d)同时可以得出主开关 S_1 发生关断动作时,在电压 u_{s_1} 增大前,电流 i_{s_1} 已经变化到零,主开关 S_1 关断时处于零电流软关断状态.

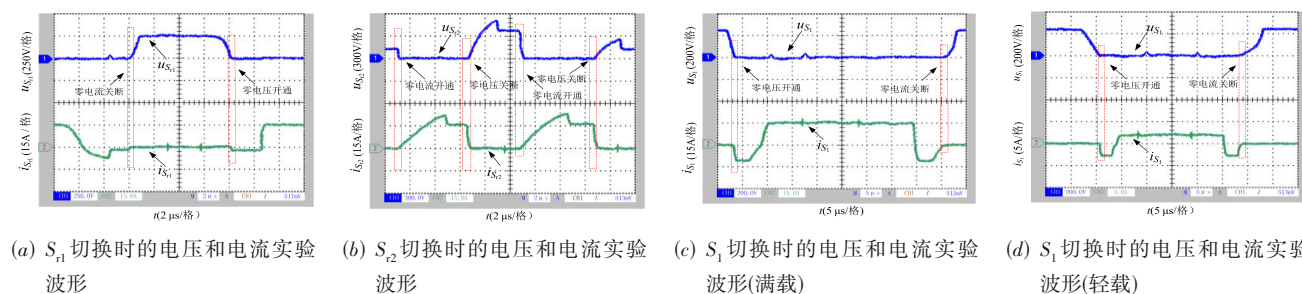


图5 实验波形

4 结论

与同类型的三相谐振直流环节逆变器相比较,本文设计的逆变器的突出优点是主开关和串接在直流母线上的辅助开关既能实现零电压软开通动作,又能实现零电流软关断动作. 经实验验证得到的结论如下:逆变器主开关和辅助开关都可以完成软切换动作. 当该三相逆变器应用在较大功率场合时,有利于IGBT作为逆变器的开关器件.

参考文献

- [1] CHU E H, WU M Y, HUANG L, 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, 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 Q, LIU Y S, CHEN X X, 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)
- [3] 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 Q, XING Y. Soft switching voltage source inverter with parallel resonant DC link[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(11): 2317-2320. (in Chinese)
- [4] 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 Q, LIU Y S, CHEN X X, et al. Parallel resonant DC link inverter with low-loss auxiliary circuit[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(7): 1369-1373. (in Chinese)

- [5] 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 Q, HU F, WANG T S, 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)

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



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