

具有低能耗辅助电路的三相谐振极逆变器

王 强^{1,2}, 曹 睿^{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: 为优化三相逆变器的效率, 提出了一种具有低能耗辅助电路的三相谐振极逆变器, 其各相桥臂上分别设置了辅助电路. 在辅助电路工作时, 主开关可实现零电压软切换, 辅助开关可实现零电流软切换, 使开关损耗明显降低. 此外, 在辅助电路的谐振状态结束之后, 谐振电感中的剩余电能将只通过 1 个二极管回馈给储能电容, 降低了电能回馈时的辅助电路损耗, 有利于实现辅助电路的低能耗. 说明了电路的工作流程. 实验波形显示主开关和辅助开关能完成软切换. 该研究成果对于研发高效率三相逆变器具有参考意义.

关键词: 逆变器; 桥臂; 辅助电路; 谐振; 低能耗; 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 (2021)01-0167-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20191330

Three-Phase Resonant Pole Inverter with Low-Loss Auxiliary Circuit

WANG Qiang^{1,2}, CAO Rui^{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 optimize the efficiency of three-phase inverter, a three-phase resonant inverter with low-loss auxiliary circuit is proposed, in which auxiliary circuit is set up on the bridge arm of each phase. When the auxiliary resonant circuit works in the commutation process of the inverter, the main switches can achieve zero-voltage soft-switching, and the auxiliary switches can achieve zero-current soft-switching. The switching loss is obviously reduced. In addition, after the resonance state of the auxiliary circuit ends, the remaining electric energy in the resonant inductance will be fed back to the energy-storage capacitance through only one diode, reducing the loss of the auxiliary circuit when the electric energy is fed back, which is beneficial to the realization of the low-loss of the auxiliary circuit. In this paper, the working flow of the circuit is illustrated. The experimental waveforms show that both the main switch and the auxiliary switch achieve soft-switching. The research findings have reference for the research and development of high-efficiency three-phase inverter.

Key words: inverter; bridge arm; auxiliary circuit; resonance; low-loss; soft-switching; switching loss

1 引言

在谐振极软开关逆变器的辅助电路参与换流过程中, 对逆变器的直流电压利用率不存在负面影响. 因此, 研究人员越来越重视谐振极逆变器的研究, 已设计出多种性能优良的拓扑结构, 但是仍然存在待改善之处. 文献[1~4]提出的拓扑结构中, 在辅助电路谐振状

态结束之后, 谐振电感中的剩余电能将通过多个器件回馈给直流电源或储能电容, 电能回馈回路里产生的器件通态损耗较大, 不利于降低辅助电路处于能量回馈时的能耗.

为改善谐振极逆变器的性能, 本文提出了一种新型三相谐振极逆变器, 其创新之处是在辅助电路的谐振状态结束之后, 谐振电感中的剩余电能将只通过 1 个

收稿日期: 2019-12-01; 修回日期: 2020-01-15; 责任编辑: 覃怀银

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51207069); 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)

辅助二极管回馈给储能电容,降低了电能回馈时的辅助电路损耗,有利于实现辅助电路的低能耗. 本文将阐述电路在每个开关周期的工作流程,利用在实验样机上获取的实验波形来证明该逆变器的特性.

2 电路结构和工作流程说明

2.1 电路结构和软开关实现机理

如图 1 所示,各相桥臂上的辅助电路结构相同,以 a 相桥臂为例,其辅助电路包括谐振电容 C_{i3} 和 C_{i4} ,谐振电感 L_{r1} ,两个辅助二极管 D_7, D_8 和辅助开关 S_{1a}, S_{2a} 及其反并联二极管 D_{1a}, D_{2a} . C_1 和 C_2 为电容值较大的分压电容,而且在实际应用中 C_1 和 C_2 分别并联了大阻值低功率的均压电阻,在稳态时,可实现 C_1 和 C_2 的电压 U_{C_1} 和 U_{C_2} 约等于 $U_d/2$. 主开关 $S_1 \sim S_6$ 完成开通动作之前,其端电压能先变化为零,即 $S_1 \sim S_6$ 可完成零电压软开通动作;在 $S_1 \sim S_6$ 完成关断动作时,谐振电容 $C_{i3} \sim C_{i8}$ 能使 $S_1 \sim S_6$ 的端电压上升变慢,即 $S_1 \sim S_6$ 可完成零电压软关断动作;在辅助开关 $S_{1a} \sim S_{6a}$ 完成开通动作时, L_{r1}, L_{r2} 和 L_{r3} 能使流过 $S_{1a} \sim S_{6a}$ 的电流上升变慢,即 $S_{1a} \sim S_{6a}$ 可完成零电流软开通动作;在 $S_{1a} \sim S_{6a}$ 完成关断动作前,流过 $S_{1a} \sim S_{6a}$ 的电流能先变化为零,即 $S_{1a} \sim S_{6a}$ 可完成零电流软关断动作.

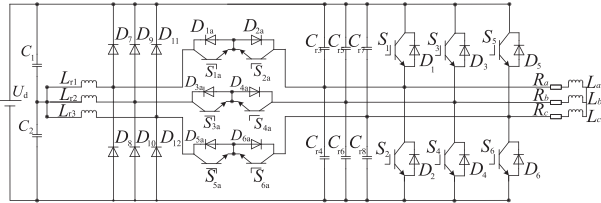


图1 具有低能耗辅助电路的三相谐振极逆变器主电路

2.2 电路的工作流程说明

在工作流程说明中,电路满足以下条件:器件工作于理想状态;负载等效为恒流源; C_1 与 C_2 电压值恒定,可看作是恒压源. 本文将以 a 相桥臂的辅助谐振电路为例,来说明其工作流程. 逆变器的单相等效电路如图 2 所示,其中的箭头指出了参考正方向. 电路在 1 个开关周期内的理论工作波形如图 3 所示. 各流程等效电路图如图 4 所示. 在图 4(d) 和图 4(i) 中,谐振结束之后,谐振电感 L_{r1} 中的剩余电能仅通过 1 个辅助二极管回馈给储能电容,有利于降低回馈电能时的辅助电路损耗.

流程 1 ($t \sim t_0$): 电路保持为稳态,辅助电路不工作.

流程 2 ($t_0 \sim t_1$): 在 t_0 时刻, S_{2a} 触发脉冲变为高电平. 在 S_{2a} 开通之后, L_{r1} 进入充电状态, $i_{L_{r1}}$ 以恒定的速度反向增大. 在 t_1 时刻, $i_{L_{r1}}$ 反向增大为 I_{b1} , 流程 2 结束.

流程 3 ($t_1 \sim t_2$): 在 t_1 时刻, S_1 触发脉冲变为低电平,

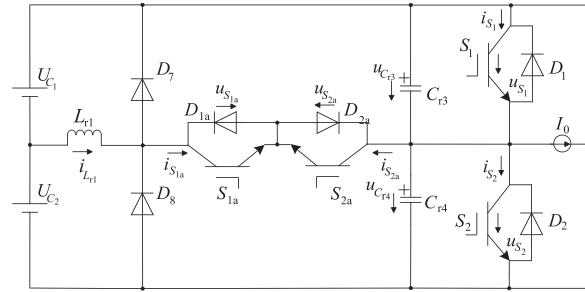


图2 高效率三相谐振极逆变器的单相等效电路

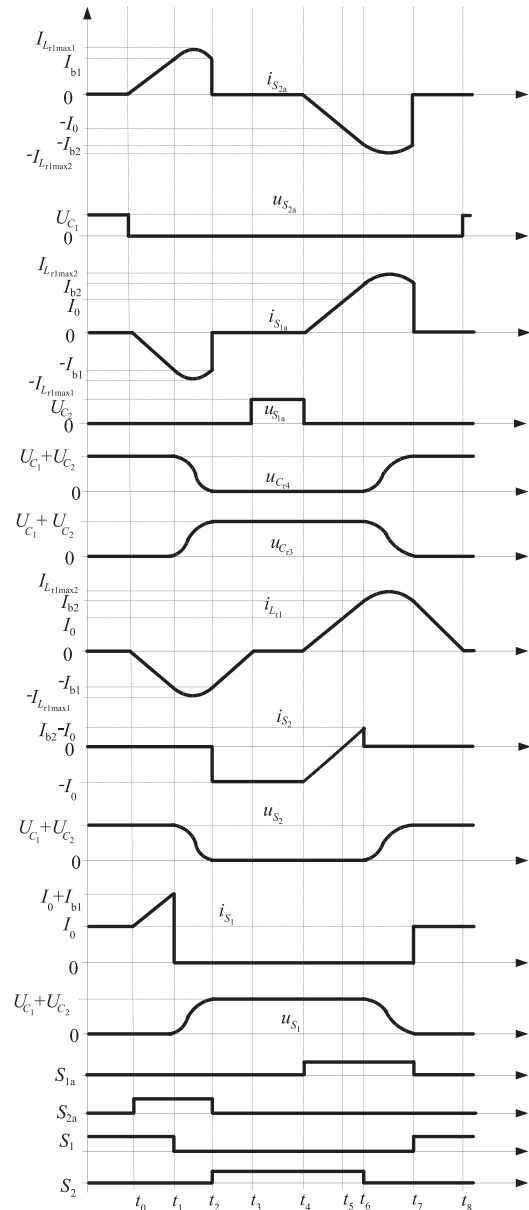


图3 谐振换流期间的理论工作波形

C_{i3}, C_{i4} 和 L_{r1} 工作于谐振状态, $i_{S_{2a}}$ 从 I_{b1} 开始增大到 $I_{L_{r1max1}}$, 再减小到 I_{b1} . 在 $u_{C_{i4}}$ 变化到 U_{C_2} 时, $i_{L_{r1}}$ 到达反向最大值 $I_{L_{r1max1}}$. 在 $u_{C_{i4}}$ 变化到零的 t_2 时刻, $i_{L_{r1}}$ 变化为 $-I_{b1}$,

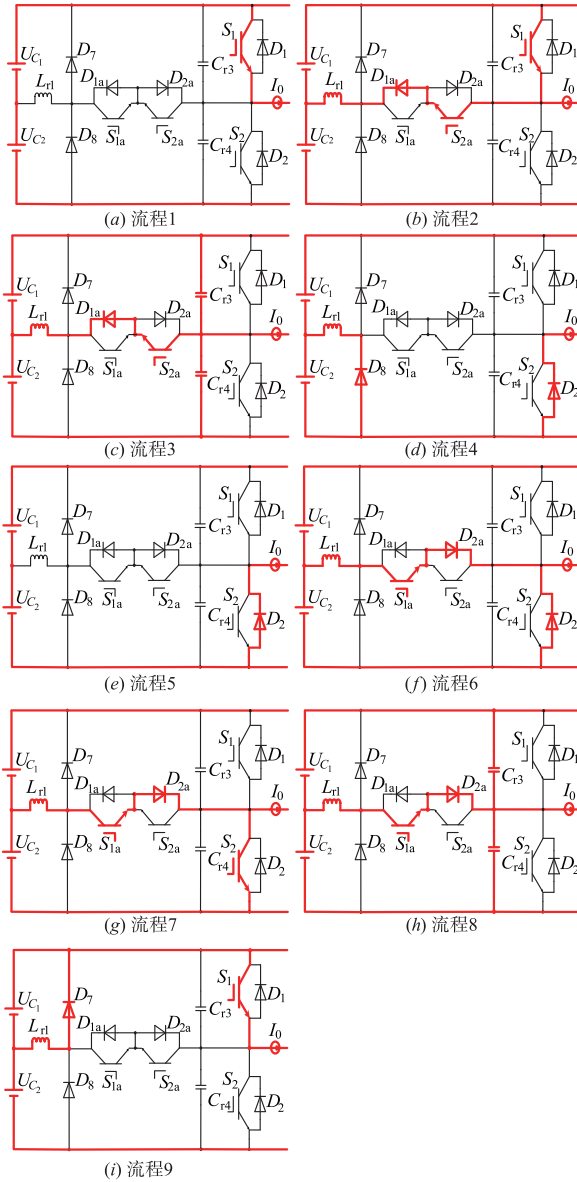


图4 各工作流程的等效电路图

流程 3 结束.

流程 4 ($t_2 \sim t_3$): 在 t_2 时刻, S_{2a} 触发脉冲变为低电平, 同时 S_2 触发脉冲变为高电平, D_8 导通, C_{r3} , C_{r4} 和 L_{r1} 谐振结束. 在该流程中, L_{r1} 进入放电状态, $i_{L_{r1}}$ 以恒定速度反向变小. 在 t_3 时刻, $i_{L_{r1}}$ 变化为零, 流程 4 结束.

流程 5 ($t_3 \sim t_4$): I_0 将通过 D_2 续流. 该流程中, $u_{C_{r3}}$ 和 $u_{C_{r4}}$ 分别等于 $U_{C_1} + U_{C_2}$ 和 0, $i_{L_{r1}}$ 等于 0, 电路工作于稳定状态.

流程 6 ($t_4 \sim t_5$): 在 t_4 时刻, S_{1a} 触发脉冲变为高电平, 然后 L_{r1} 进入充电状态, $i_{L_{r1}}$ 从 0 开始增大. 在 t_5 时刻, $i_{L_{r1}}$ 以恒定速度变化到 I_0 , 流程 6 结束.

流程 7 ($t_5 \sim t_6$): 在该流程中, L_{r1} 继续处于充电状态, $i_{L_{r1}}$ 从 I_0 开始继续增大. 到 t_6 时刻, $i_{L_{r1}}$ 以恒定速度变化到 $I_{L_{r1max2}}$, 流程 7 结束.

流程 8 ($t_6 \sim t_7$): 在 t_6 时刻, S_2 触发脉冲变为低电平, 然后 C_{r3} , C_{r4} 和 L_{r1} 工作于谐振状态, $i_{L_{r1}}$ 处于先增大再减小的过程. 在 $u_{C_{r3}}$ 减小为 U_{C_1} 时, $i_{L_{r1}}$ 增大到峰值 $I_{L_{r1max2}}$. 在 $u_{C_{r3}}$ 减小为 0 的 t_7 时刻, $i_{L_{r1}}$ 减小为 $I_{L_{r1max2}}$, 流程 8 结束.

流程 9 ($t_7 \sim t_8$): 在 t_7 时刻, S_1 触发脉冲变为高电平, 同时 S_{1a} 触发脉冲变为低电平, D_7 导通, C_{r3} , C_{r4} 和 L_{r1} 谐振结束. 在该流程中, $i_{L_{r1}}$ 以恒定的速度减小. 到 t_8 时刻, $i_{L_{r1}}$ 变为 0, 流程 9 结束.

以上为电路在 1 个开关周期内的工作流程说明.

3 实验验证

样机参数如下: 额定输出功率 $P_0 = 3\text{kW}$, 直流电源电压 $U_d = 220\text{V}$, S_{1a} , S_{3a} 和 S_{5a} 的触发脉冲占空比为 $\rho_{S_{1a}} = \rho_{S_{3a}} = \rho_{S_{5a}} = 0.126$, S_{2a} , S_{6a} 和 S_{4a} 的触发脉冲占空比为 $\rho_{S_{2a}} = \rho_{S_{6a}} = \rho_{S_{4a}} = 0.111$, 最大负载电流 $I_{0max} = 18\text{A}$, 三相谐振电容 $C_{r3} = C_{r4} = C_{r5} = C_{r6} = C_{r7} = C_{r8} = 0.018\mu\text{F}$, 三相谐振电感 $L_{r1} = L_{r2} = L_{r3} = 20\mu\text{H}$, 三相负载电阻 $R_a = R_b = R_c = 6\Omega$, 三相负载电感 $L_a = L_b = L_c = 0.8\text{mH}$, 开关频率 $f_c = 20\text{kHz}$, 输出频率 $f_0 = 50\text{Hz}$, 死区时间 $\Delta = 2.8\mu\text{s}$.

在满载和轻载下, S_1 进行切换动作时的 u_{S_1} 和 i_{S_1} 的实验波形分别如图 5(a) 和图 5(b) 所示, 波形显示出 u_{S_1} 增大的速度受到了限制, 取得了 S_1 的零电压软关断; 在 i_{S_1} 开始增大的瞬间, u_{S_1} 已等于零, 所以取得了 S_1 的零电压软开通. S_{1a} 和 S_{2a} 进行切换动作时的端电压 $u_{S_{1a}}$, $u_{S_{2a}}$ 和流过的电流 $i_{S_{1a}}$, $i_{S_{2a}}$ 的实验波形分别如图 5(c) 和图 5(d) 所示, 波形显示 $i_{S_{1a}}$ 和 $i_{S_{2a}}$ 增大的速度受到了限制, 实现了 S_{1a} 和 S_{2a} 的零电流软开通; 在 $u_{S_{1a}}$ 和 $u_{S_{2a}}$ 上升之前, $i_{S_{1a}}$ 和 $i_{S_{2a}}$ 已经为零, 实现了 S_{1a} 和 S_{2a} 的零电流软关断.

4 结论

提出的新型三相谐振极逆变器的显著创新是辅助电路中的能量回馈回路只包含 1 个辅助二极管与 1 个谐振电感, 有利于降低辅助电路在向直流电源或储能电容回馈谐振结束之后的剩余电能时所产生的能耗, 从而实现辅助电路低能耗运行和优化逆变器效率. 通过观察实验波形, 得出结论: 主开关和辅助开关都能分别实现零电压软切换和零电流软切换.

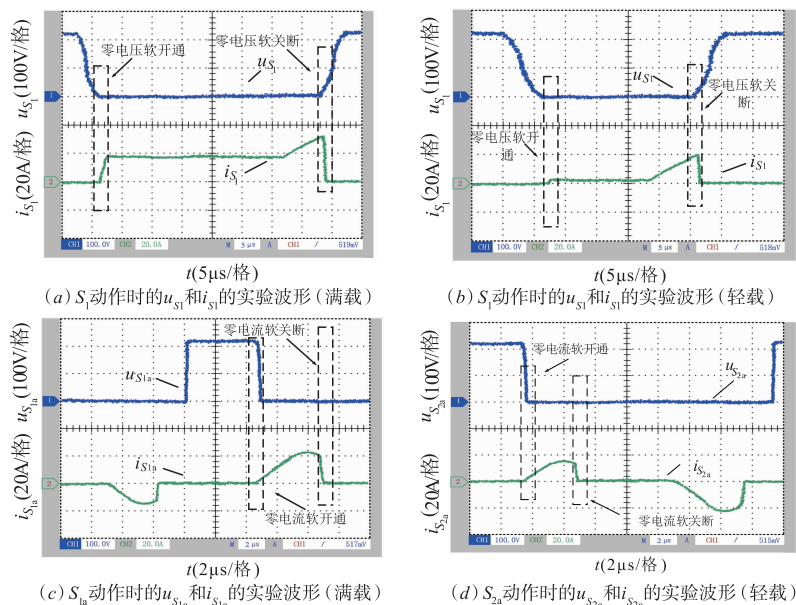


图5 实验波形

参考文献

- [1] Chu Enhui, Zhang Xing, Huang Liang. Research on a novel modulation strategy for double auxiliary resonant commutated pole soft-switching inverter with the shunt dead time [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10):6855-6868.
- [2] Chu Enhui, Zhang Xing, Sun Qiuye, et al. Three-phase double auxiliary resonant commutated pole inverter topology and analysis of its working principle[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(7):1536-1545.
- [3] 褚恩辉, 黄亮, 张化光, 等. 一种双辅助谐振极型三相软

开关逆变器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15):3912-3920.

Chu Enhui, Huang Liang, Zhang Huaguang, et al. Study on a double auxiliary resonant commutated pole three-phase soft-switching inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15):3912-3920. (in Chinese)

- [4] 王强, 徐有万, 王天施, 等. 新型三相谐振极软开关逆变器[J]. 电子学报, 2019, 47(6):1373-1377.

Wang Qiang, Xu Youwan, Wang Tianshi, et al. Novel three-phase resonant pole soft-switching inverter [J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(6):1373-1377. (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



曹睿 男, 1997年4月出生于辽宁省大连市, 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: 302955678@qq.com