

高效率三相谐振极逆变器

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性能, 提出了一种高效率三相谐振极逆变器. 在各相桥臂上增设的辅助谐振电路参与逆变器的换流过程时, 桥臂上的各主开关并联的谐振电容的电压能周期性形成零状态, 使主开关能完成零电压软切换, 而且辅助谐振电路中的各开关器件也能完成零电流软开通和零电压软关断. 开关器件实现软切换能降低开关损耗, 从而使逆变器实现高效率运行. 文中分析了电路的工作流程. 3kW 样机上的实验结果表明主开关和辅助开关都处于软切换. 因此, 该拓扑结构对于研发高性能三相逆变器具有借鉴价值.

关键词: 逆变器; 桥臂; 辅助电路; 谐振; 高效率; 软开关

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)06-1224-04
电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20190910

High-Efficiency Three-Phase Resonant Pole Inverter

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 performance of three-phase inverter, a high efficiency three-phase resonant inverter is proposed. When the auxiliary resonant circuit on each phase leg works in the commutation process of the inverter, the voltage across the capacitor parallel with the main switch can periodically change to zero, so that the main switch device can achieve zero-voltage soft switching, and the switching devices in the auxiliary resonant circuit can achieve zero-voltage turn-on and zero-current turn-off. Soft switching can reduce switching loss and improve the efficiency of the inverter. In this paper, the working flow of the circuit is analyzed. The experimental results on the 3kW prototype show that both the main switch and the auxiliary switch achieve soft switching. Therefore, this topology structure has reference for the research and development of high performance three-phase inverter.

Key words: inverter; bridge arm; auxiliary circuit; resonance; high efficiency; soft-switching

1 引言

谐振极软开关逆变器的辅助谐振电路处于各相桥臂^[1-4], 辅助电路的工作过程对直流环节电压无不利影响, 所以谐振极逆变器在近些年已逐渐成为研究热点. 相关文献已提出了多种谐振极逆变器, 但还存在待优化之处. 文献[1]提出的拓扑结构的每相辅助电路包含4个辅助开关, 辅助开关较多会导致辅助电路结构复杂化, 而且不利于降低辅助电路硬件成本; 文献[2,3]提出的拓扑结构的每相辅助电路包含2个辅助开关, 虽然辅助开关数较少, 但是每相辅助电路还需要设置4个谐

振电感, 6个谐振电容和8个辅助二极管, 辅助电路结构同样比较复杂; 文献[4]提出的拓扑结构的每相辅助电路仅含有2个辅助开关, 1个谐振电感和1个谐振电容, 虽然辅助电路器件较少, 但是谐振电感与桥臂串联会导致辅助电路的通态损耗较大.

为优化以上不足之处, 本文提出了一种高效率三相谐振极逆变器, 其优势是: (1) 各相辅助电路与桥臂并联, 限制了辅助电路通态损耗, 而且辅助电路结构相对简单, 仅包含2个辅助开关, 1个谐振电感和3个谐振电容; (2) 开关器件承受的最大电压都不高于直流电源电压, 避免了使用耐压更高和价格更高的开关器件;

(3)在保证主开关完成软切换的同时,辅助开关也能可靠完成软切换;(4)各辅助开关的触发脉冲占空比可以设计为固定值,简化了辅助电路控制.本文详细分析了电路工作过程,在额定功率为 3kW 的实验样机上验证了该三相谐振极逆变器的性能.

2 电路工作过程分析

2.1 电路结构和软开关实现原理

图 1 给出了逆变器主电路,每相桥臂分别设置了辅助电路.如图 1 所示,*a* 相桥臂上的辅助电路包括谐振电容 C_{r1}, C_{r2} 和 C_{ra} ,谐振电感 L_{ra} 和辅助开关 S_{1a}, S_{2a} 及其反并联二极管 D_{1a}, D_{2a} ; *b* 相桥臂上的辅助电路包括谐振电容 C_{r3}, C_{r4} 和 C_{rb} ,谐振电感 L_{rb} 和辅助开关 S_{3a}, S_{4a} 及其反并联二极管 D_{3a}, D_{4a} ; *c* 相桥臂上的辅助电路包括谐振电容 C_{r5}, C_{r6} 和 C_{rc} ,谐振电感 L_{rc} 和辅助开关 S_{5a}, S_{6a} 及其反并联二极管 D_{5a}, D_{6a} . 各相的辅助谐振电路相互独立.逆变器桥臂上的主开关 $S_1 \sim S_6$ 开通之前,利用辅助谐振电路使与 $S_1 \sim S_6$ 并联的 $C_{r1} \sim C_{r6}$ 电压先降到零,以使 $S_1 \sim S_6$ 实现零电压软开通;在 $S_{1a} \sim S_{6a}$ 开通瞬间,利用 L_{ra}, L_{rb} 和 L_{rc} 来限制流过 $S_{1a} \sim S_{6a}$ 的电流的变化率来降低开通损耗,使 $S_{1a} \sim S_{6a}$ 实现零电流软开通;在 $S_1 \sim S_6$ 和 $S_{1a} \sim S_{6a}$ 需要关断时,分别利用 $C_{r1} \sim C_{r6}$ 和 $C_{ra} \sim C_{rc}$ 来限制 $S_1 \sim S_6$ 和 $S_{1a} \sim S_{6a}$ 发生关断动作时的端电压上升速度,以使 $S_1 \sim S_6$ 和 $S_{1a} \sim S_{6a}$ 实现零电压软关断.

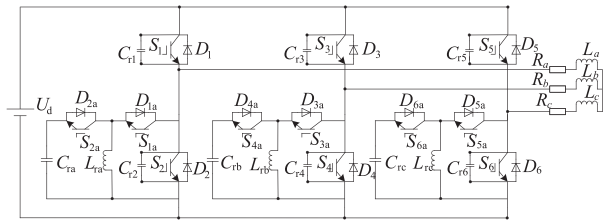


图1 高效率三相谐振极逆变器主电路

2.2 电路的工作流程

为简化分析过程,可以认为:(1)各器件都是理想器件;(2)因为负载电感值远大于谐振电感值,在一个开关周期内负载电流 I_0 是恒定的,负载可被看作是恒流源.因为图 1 中的三相辅助谐振电路是彼此独立可控的,因此本文将分析单相辅助谐振电路在 1 个开关周期内的工作流程,图 2 给出了逆变器的单相等效电路及物理量的参考正方向. 10 个流程被包含在电路每个开关周期的工作过程,图 3 给出了电路的特征波形,图 4 为各流程等效电路图.

流程 1 ($t \sim t_0$):该流程中,电流流过 S_1 ,没有电流流过其它开关器件,此时 C_{ra} 和 C_{r1} 两端电压 u_{Cra} 和 u_{Cr1} 都等于零, C_{r2} 两端电压 u_{Cr2} 为 U_d ,流过 L_{ra} 的电流 i_{Lra} 等于零,流过 S_1 的电流 i_{S1} 等于负载电流 I_0 ,电路处于稳态.

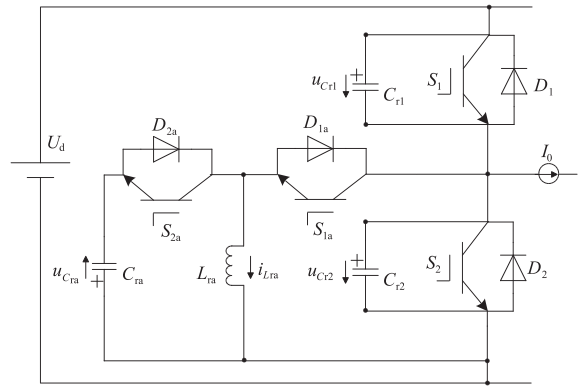


图2 高效率三相谐振极逆变器的单相等效电路

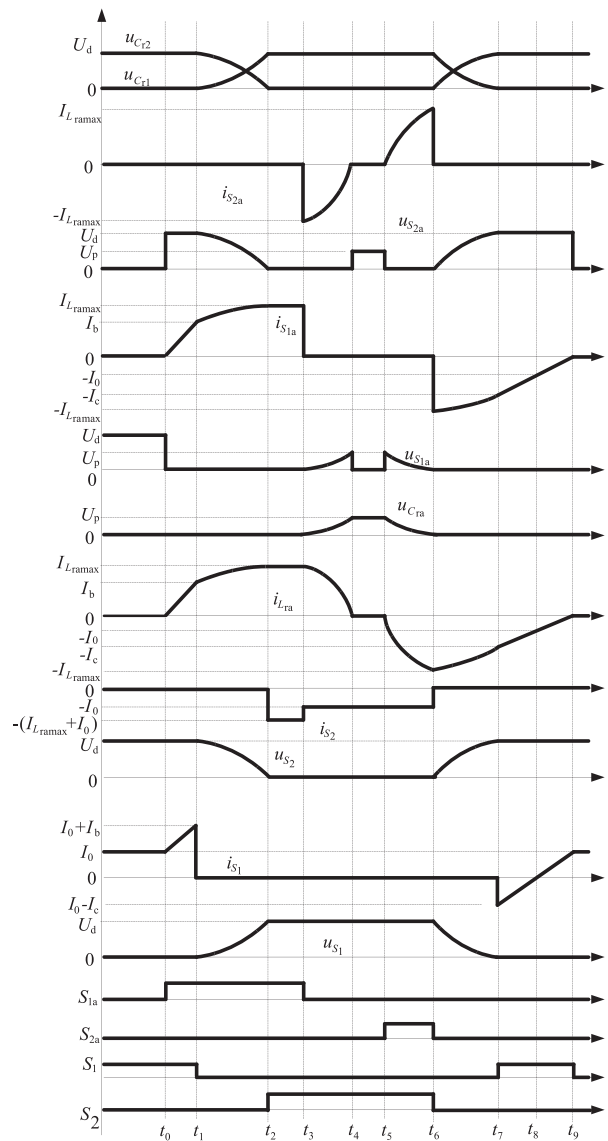


图3 谐振换流期间的理论工作波形

流程 2 ($t_0 \sim t_1$):在 t_0 时刻,开通 S_{1a} . S_{1a} 开通之后, L_{ra} 被充电, i_{Lra} 开始处于正向线性增大的状态,流过 S_1 的电流 i_{S1} 从 I_0 开始线性增大到 $I_0 + I_b$. 在 t_1 时刻, i_{Lra} 正向

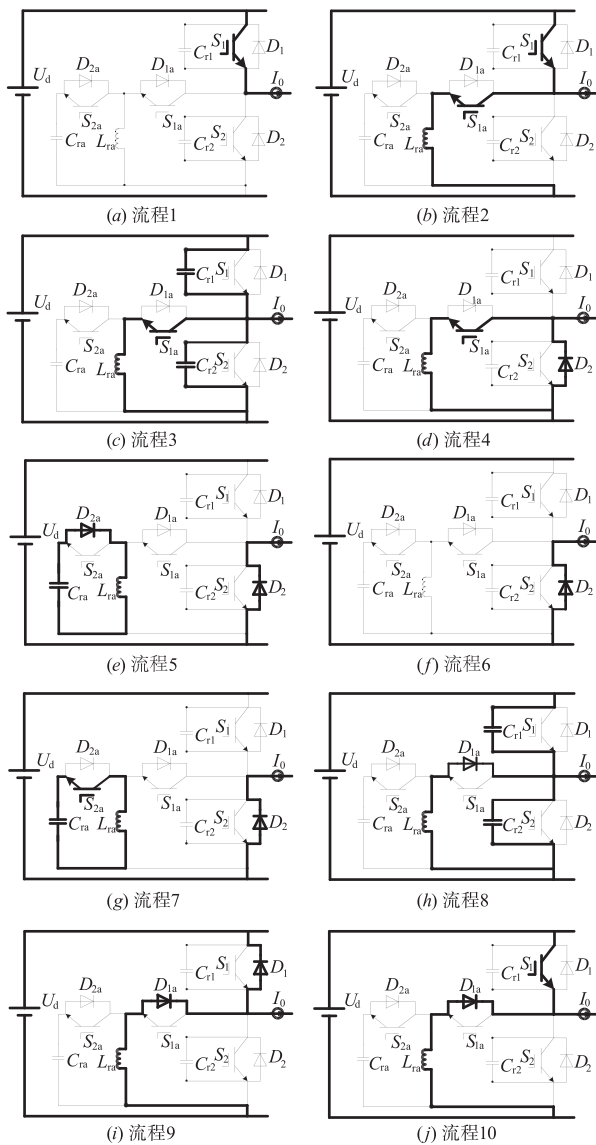


图4 各工作流程的等效电路图

线性增大到 I_b , 流程 2 结束, $u_{c_{ra}}$ 和 $u_{c_{r1}}$ 仍然等于零, $u_{c_{r2}}$ 仍然等于 U_d .

流程 3 ($t_1 \sim t_2$): 在 t_1 时刻, 关断 S_1 . 在 S_1 关断之后, 电流开始流过 C_{r1} , C_{r2} 和 L_{ra} . C_{r1} , C_{r2} 和 L_{ra} 进入谐振状态, C_{r2} 开始放电, C_{r1} 和 L_{ra} 被充电, $i_{L_{ra}}$ 继续正向增大, 在 $u_{c_{r1}}$ 变化到与 U_d 相等的 t_2 时刻, $i_{L_{ra}}$ 到达正向最大值 $I_{L_{ra}max}$, 流程 3 结束.

流程 4 ($t_2 \sim t_3$): 在 t_2 时刻, D_2 导通, C_{r1} , C_{r2} 和 L_{ra} 谐振结束, $u_{c_{r1}}$ 增加到 U_d , $u_{c_{r2}}$ 减小到零. 在该流程中, $i_{L_{ra}}$ 仍然等于 $I_{L_{ra}max}$, $u_{c_{r1}}$ 仍然等于 U_d , $u_{c_{ra}}$ 和 $u_{c_{r2}}$ 仍然等于零, 电路处于稳态.

流程 5 ($t_3 \sim t_4$): 在 t_3 时刻, S_{1a} 发生关断动作. 在 S_{1a} 关断之后, 电流开始流过 C_{ra} 和 L_{ra} . C_{ra} 和 L_{ra} 进入谐振状态, L_{ra} 开始放电, C_{ra} 被充电, $i_{L_{ra}}$ 开始减小, t_4 时刻, $i_{L_{ra}}$ 变成零,

$u_{c_{ra}}$ 达到正向最大值 U_p , I_0 通过 D_2 续流, 流程 5 结束.

流程 6 ($t_4 \sim t_5$): I_0 开始通过 D_2 续流. 该流程中, $u_{c_{ra}}$ 等于 U_p , $u_{c_{r1}}$ 等于 U_d , $u_{c_{r2}}$ 等于零, $i_{L_{ra}}$ 等于零, 电路处于稳态.

流程 7 ($t_5 \sim t_6$): 在 t_5 时刻, 开通 S_{2a} . 在 S_{2a} 开通之后, 电流开始流过 C_{ra} 和 L_{ra} . C_{ra} 和 L_{ra} 进入谐振状态, C_{ra} 开始放电, L_{ra} 被充电, $i_{L_{ra}}$ 从零开始开始反向增大, 在 $u_{c_{ra}}$ 等于零的 t_6 时刻, $i_{L_{ra}}$ 达到反向最大值 $I_{L_{ra}max}$, I_0 通过 D_2 续流, 流程 7 结束.

流程 8 ($t_6 \sim t_7$): 在 t_6 时刻, 关断 S_{2a} . 在 S_{2a} 关断之后, 电流开始流过 C_{r1} , C_{r2} 和 L_{ra} . C_{r1} , C_{r2} 和 L_{ra} 进入谐振状态, C_{r1} 开始放电, L_{ra} 和 C_{r2} 被充电, $i_{L_{ra}}$ 处于反向减小的过程, 在 $u_{c_{r1}}$ 变成零的 t_7 时刻, $i_{L_{ra}}$ 达到 $-I_c$, 流程 8 结束.

流程 9 ($t_7 \sim t_8$): 在 t_7 时刻, D_1 导通, C_{r1} , C_{r2} 和 L_{ra} 谐振结束, $u_{c_{r1}}$ 减小到零, $u_{c_{r2}}$ 增加到 U_d . 在该流程中, $i_{L_{ra}}$ 处于反向线性减小的状态, 在 t_8 时刻, $i_{L_{ra}}$ 反向减小到 $-I_0$, 流过 D_1 的电流减小到零, 流程 9 结束.

流程 10 ($t_8 \sim t_9$): 在 t_8 时刻, 使端电压等于零的主开关 S_1 开通, 所以 S_1 在开通时处于零电压软开通状态. L_{ra} 被充电, $i_{L_{ra}}$ 继续处于反向线性减小的状态, i_{S_1} 从零开始线性增大到 I_0 . 在 t_9 时刻, $i_{L_{ra}}$ 反向线性减小到零, 流过 D_{1a} 的电流变化为零, 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 1 个开关周期的工作.

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 $U_d = 300\text{V}$, 三相负载电阻 $R_a = R_b = R_c = 11\Omega$, 三相负载电感 $L_a = L_b = L_c = 0.8\text{mH}$, 辅助开关 S_{1a} , S_{3a} 和 S_{5a} 的触发脉冲占空比为 $\rho_{S_{1a}} = \rho_{S_{3a}} = \rho_{S_{5a}} = 0.049$, 最大负载电流 $I_{0max} = 13\text{A}$, 开关频率 $f_c = 20\text{kHz}$, 输出频率 $f_0 = 50\text{Hz}$, 三相谐振电感 $L_{ra} = L_{rb} = L_{rc} = 20\mu\text{H}$, 辅助开关 S_{2a} , S_{6a} 和 S_{4a} 的触发脉冲占空比为 $\rho_{S_{2a}} = \rho_{S_{6a}} = \rho_{S_{4a}} = 0.054$, 三相谐振电容 $C_{ra} = C_{rb} = C_{rc} = 0.15\mu\text{F}$, 死区时间 $\Delta = 1.2\mu\text{s}$, $C_{r1} = C_{r2} = C_{r3} = C_{r4} = C_{r5} = C_{r6} = 0.01\mu\text{F}$.

图 5(a) 和图 5(b) 分别给出了在满载和轻载下, S_1 进行切换动作时的 u_{S_1} 和 i_{S_1} 的实验波形, 从图 5(a) 和图 5(b) 可以看出在 S_1 关断时, u_{S_1} 以较低的变化率正向增大, 所以满载和轻载条件下取得了 S_1 的零电压软关断; 从图 5(a) 和图 5(b) 还可以看出 i_{S_1} 从零增大之前, u_{S_1} 已经变化到零, 所以满载和轻载时都实现了 S_1 的零电压软开通. 图 5(c) 和图 5(d) 分别给出了 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 $i_{S_{1a}}$, $i_{S_{2a}}$

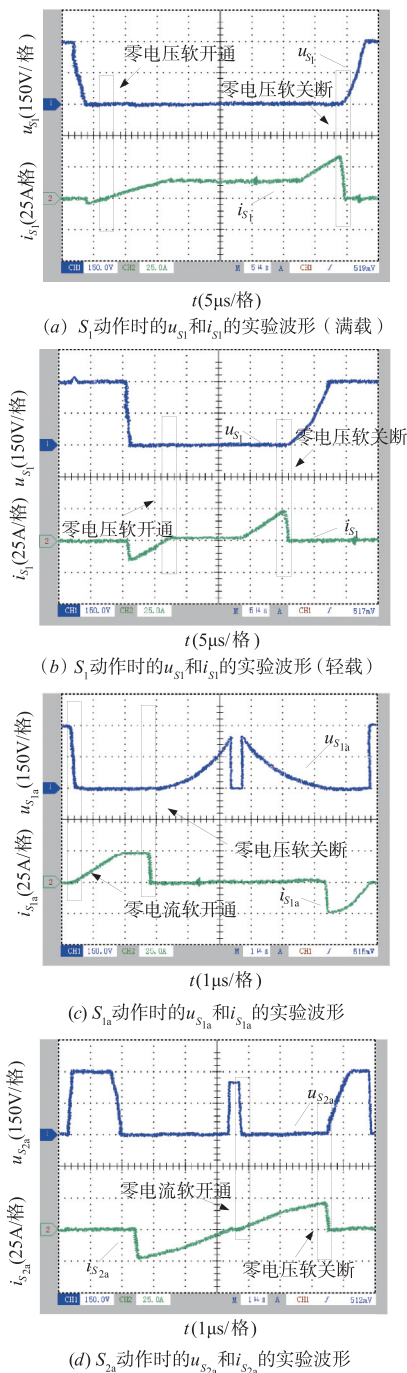


图5 实验波形

的实验波形,从图 5(c) 和图 5(d) 可以看出 S_{1a} 和 S_{2a} 开通时, i_{s1a} 和 i_{s2a} 以较低的变化率正向增大,实现了 S_{1a} 和 S_{2a} 的零电流软开通;从图 5(c) 和图 5(d) 能发现在 S_{1a} 和 S_{2a} 关断之前, u_{s1a} 和 u_{s2a} 均以较低的变化率正向增大,实现了 S_{1a} 和 S_{2a} 的零电压软关断。

4 结论

提出了一种高效率三相谐振极逆变器,对比同类

型的软开关逆变器,其突出优势是辅助电路的结构简单,而且辅助开关的触发脉冲占空比可设计为固定值,逆变器运行的可靠性较高。经实验验证得到结论:主开关和辅助开关都能完成软切换动作。

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)
- [5] Chu Enhui, Chen Zhifang, Xie Haolin, et al. Modified double auxiliary resonant commutated pole inverter and its modulation strategy [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 4467 – 4481.

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