

新型三相谐振直流环节逆变器

王 强^{1,2}, 李 森^{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谐振直流环节逆变器拓扑结构, 其在直流环节设置了结构简单的辅助谐振电路. 分析了电路的工作流程. 实验结果表明开关器件实现了软切换, 而且逆变器输出电流波形无明显畸变. 因此, 该逆变器能实现高效率稳定运行.

关键词: 高效率; 逆变器; 直流环节; 谐振; 软开关; 零电压

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2021)08-1641-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20191079

Novel Three-Phase Resonant DC Link Inverter

WANG Qiang^{1,2}, LI Sen^{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 achieve high efficiency operation of three-phase inverter, a novel topology of the three-phase resonant DC(Direct Current) link inverter is proposed, in which a simple auxiliary resonant circuit is set up in the DC link. The working flow of the circuit is analyzed. The experimental results show that the switching device achieves soft switching and the output current waveform of the inverter has no obvious distortion. Therefore, the inverter can realize high-efficiency and stable operation.

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

1 引言

三相谐振直流环节逆变器只需在直流环节设置1组辅助电路^[1,2]. 因此, 谐振直流环节逆变器更有利于设置成本相对较低的辅助电路. 近些年, 谐振直流环节逆变器已逐渐成为研究热点, 但仍需要进一步优化以促进其推广应用. 例如文献[3,4]提出的拓扑结构含有无源辅助器件较多, 辅助电路硬件成本较高, 在输出功率10kW时的效率接近98%, 而且为优化直流电压利用率和轻载时的效率, 辅助电路中3个开关器件的触发脉冲占空比都要根据负载电流瞬时值来实时变化, 这就需要高精度的负载电流检测环节, 一旦负载电流检测环节受到外界干扰, 将直接影响辅助开关的正常切换, 导致该逆变器无法正常运行.

本文为进一步优化谐振直流环节逆变器, 提出了一种新型三相谐振直流环节逆变器拓扑结构, 相比于

同类型软开关逆变器, 其具有优势如下: 位于直流母线之间的2个辅助开关的触发脉冲占空比与负载电流瞬时值无关, 都可以设计为固定值, 简化了辅助电路控制, 改善了逆变器的可靠性. 文中将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_{a1} 、 S_{a2} 和 S_{a3} 及其反并联二极管 D_{a1} 、 D_{a2} 和 D_{a3} , 谐振电感 L_r 以及谐振电容 C_{r2} 组成了辅助谐振电路. 此外, 逆变器桥臂上的各开关器件分别并联了缓冲电容 C_s . 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切换, 使开关损耗

降低。

在以下分析中假定负载电感值足够大,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. 逆变器等效电路及物理量的参考正方向如图 2 所示,8 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。

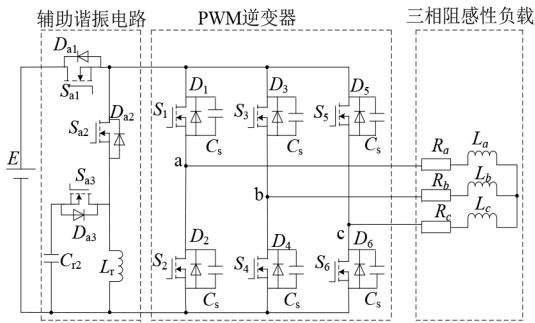


图1 新型三相谐振直流环节逆变器主电路

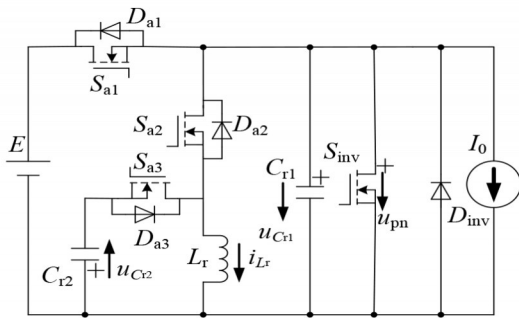


图2 逆变器的等效电路

2.2 工作流程

流程 1 ($t \sim t_0$): S_{a1} 处于导通状态,直流电源 E 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_{a2} , L_r 阻碍了 S_{a2} 开通时的电流快速增大,因此 S_{a2} 在开通时实现了零电流软开通. S_{a2} 开通以后, L_r 被充电, i_{Lr} 从零开始正向线性增大. 在 t_1 时刻,当 $i_{Lr} = I_{b1}$ 时,流程 2 结束。

流程 3 ($t_1 \sim t_2$): 在 t_1 时刻,关断 S_{a1} , C_{r1} 阻碍了 S_{a1} 关断时的电压快速增大,因此 S_{a1} 在关断时实现了零电压软关断. S_{a1} 关断以后, L_r 和 C_{r1} 开始谐振, u_{Cr1} 从 E 正向减小, i_{Lr} 从 I_{b1} 正向增大. 在 t_2 时刻, u_{Cr1} 减小到零, i_{Lr} 增大到 I_p 时,流程 3 结束。

流程 4 ($t_2 \sim t_3$): 在 t_2 时刻,关断 S_{a2} , C_{r2} 阻碍了 S_{a2} 关断时电压快速增大,因此 S_{a2} 在关断时完成了零电压软关断切换. 然后 L_r 和 C_{r2} 进入谐振状态, i_{Lr} 从 I_p 开始逐渐减小, u_{Cr2} 从零开始逐渐增大. 在 t_3 时刻,当 i_{Lr} 减小到零, u_{Cr2} 增大到 U_p 时,流程 4 结束。

流程 5 ($t_3 \sim t_4$): 在 t_3 时刻,开通 S_{a3} , 因为 S_{a3} 的端电压

在开通 S_{a3} 之前已经等于零,所以 S_{a3} 在开通时实现了零电压软开通. L_r 和 C_{r2} 继续谐振, i_{Lr} 从零开始逐渐反向增大, u_{Cr2} 从 U_p 开始逐渐降低. 在 t_4 时刻,当 u_{Cr2} 减小到零, i_{Lr} 反向增大到最大值 I_p 时,流程 5 结束。

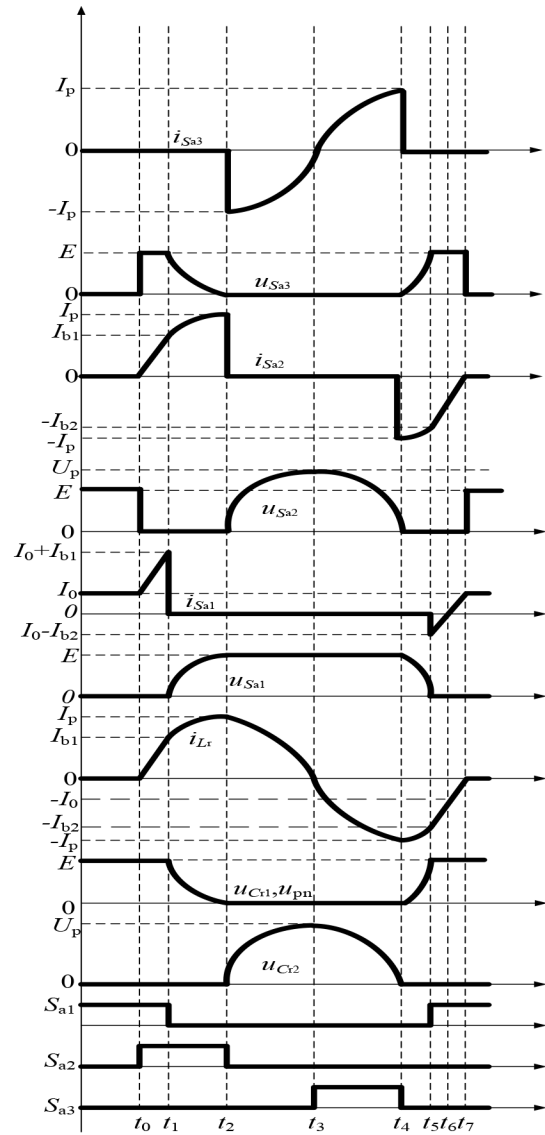


图3 谐振换流期间的理论工作波形

流程 6 ($t_4 \sim t_5$): 在 t_4 时刻, S_{a3} 被关断, C_{r1} 阻碍了 S_{a3} 关断时的电压快速增大, S_{a3} 完成了零电压关断. 然后 L_r 和 C_{r1} 进入谐振状态, u_{Cr1} 开始由零逐渐增大, i_{Lr} 由反向最大值 I_p 开始逐渐减小. 在 t_5 时刻,当 u_{Cr1} 增大到 E , i_{Lr} 反向减小到 I_{b2} 时,流程 6 结束。

流程 7 ($t_5 \sim t_6$): 在 t_5 时刻,开通 S_{a1} , 因为电流开始流过 D_{a1} , 所以 S_{a1} 完成了零电压开通切换. D_{a1} 导通以后, L_r 承受电压值为 E , i_{Lr} 开始从 I_{b2} 反向线性降低. 在 t_6 时刻,当 i_{Lr} 反向线性降低到 I_0 时,无电流流过 D_{a1} , 流程 7 结束。

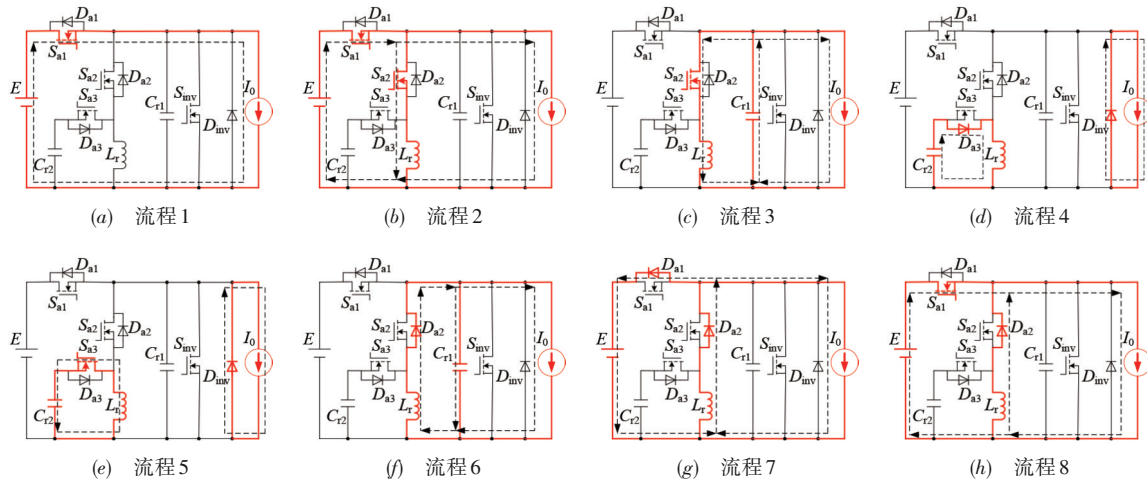


图 4 各工作流程的等效电路图

流程 8 ($t_6 \sim t_7$): 在 t_6 时刻, i_{Lr} 继续处于线性衰减状态, 电流开始流过 S_{a1} . 在 t_7 时刻, 当 i_{Lr} 线性衰减到零时, 流程 8 结束, 然后电路再次进入到流程 1.

3 实验验证

样机参数如下: 额定输出功率 $P_0=4.5\text{kW}$, 直流电源电压 $E=300\text{V}$, 负载电感 $L_a=L_b=L_c=1\text{mH}$, 负载电阻 $R_a=R_b=R_c=7.5\Omega$, 缓冲电容 $C_s=33\text{nF}$, 等效电容 $C_{r1}=99\text{nF}$, 最大负载电流 $I_{0\text{max}}=20\text{A}$, 最小负载电流 $I_{0\text{min}}=0\text{A}$, 输出相电压有效值 $U_1=100\text{V}$, 辅助开关 S_{a2} 和 S_{a3} 的触发脉冲占空

比 $\rho_{S_{a2}}$ 为 0.08, $\rho_{S_{a3}}$ 为 0.048, 开关频率 $f_c=20\text{kHz}$, 开关周期 $T=50\mu\text{s}$.

辅助开关 S_{a1} 动作时的电压 $u_{S_{a1}}$ 和电流 $i_{S_{a1}}$ 的实验波形如图 5(a) 所示. 由波形图得出 S_{a1} 开通时, 在 $i_{S_{a1}}$ 反向增大前, $u_{S_{a1}}$ 已经变化到零, S_{a1} 开通时处于零电压软开通状态; 同时可以得出 S_{a1} 关断时, $u_{S_{a1}}$ 缓慢增大, S_{a1} 关断时处于零电压软关断状态. 辅助开关 S_{a2} 动作时的电压 $u_{S_{a2}}$ 和电流 $i_{S_{a2}}$ 的实验波形如图 5(b) 所示, 由波形图得出

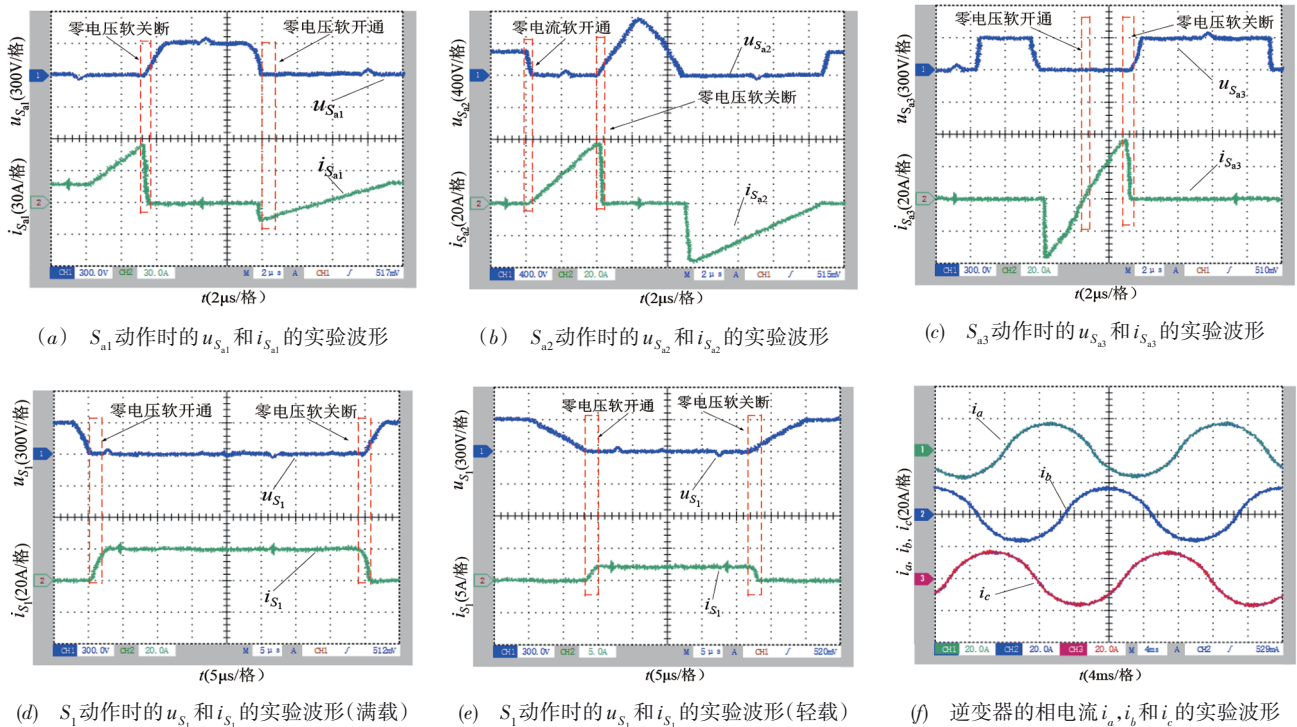


图 5 实验波形

S_{a2} 开通时, $i_{S_{a2}}$ 缓慢增大, S_{a2} 开通时处于零电流软开通状态; 同时可以得出 S_{a2} 关断时, $u_{S_{a2}}$ 缓慢增大, S_{a2} 关断时处于零电压软关断状态. 辅助开关 S_{a3} 动作时的电压 $u_{S_{a3}}$ 和电流 $i_{S_{a3}}$ 的实验波形如图 5(c) 所示, 由波形图得出 S_{a3} 开通时, 在 $i_{S_{a3}}$ 反向增大前, $u_{S_{a3}}$ 已经变化到零, S_{a3} 开通时处于零电压软开通状态; 同时可以得出 S_{a3} 关断时, $u_{S_{a3}}$ 缓慢增大, S_{a3} 关断时处于零电压软关断状态. 图 5(d) 和图 5(e) 分别给出了在满载和轻载时的主开关 S_1 动作时的电压 u_{S_1} 和电流 i_{S_1} 的实验波形, 由波形图得出 S_1 开通时, i_{S_1} 增大前, u_{S_1} 已经变化到零, S_1 开通时处于零电压软开通状态; 同时可以得出 S_1 关断时, u_{S_1} 缓慢增大, S_1 关断时处于零电压软关断状态. 图 5(f) 给出了样机输出的三相电流的实验波形, 输出频率为 50Hz, 可以看出电流波形比较光滑, 逆变器稳态运行良好.

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问题, 提出了一种新型辅助电路结构, 使谐振直流环节逆变器的性能得到优化. 通过实验验证得到以下结论: (1) 主开关动作时都处于零电压软切换, 辅助开关动作时也处于软切换; (2) 三相逆变器在额定输出频率 50Hz 时的输出电流波形无明显畸变, 正弦度较好, 在直流环节增设辅助电路对逆变器输出无影响, 逆变器可实现高效率稳定运行.

参考文献

[1] Chu E H, Li S, Xie H L, et al. RDCL three-phase inverter

and load adaptive commutation control[J]. IET Power Electronics, 2019, 12(3): 505 – 514.

[2] Wang Q, Wang Y Z. Resonant DC link soft-switching inverter with low-loss auxiliary circuit[J]. International Journal of Electronics, 2019, 106(10): 1602 – 1615.

[3] 褚恩辉, 李思, 张化光, 等. 谐振直流环节逆变器和负载自适应换流控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 256 – 265.

Chu E H, Li S, Zhang H G, et al. Resonant DC Link Inverter and Load Adaptive Commutation Control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 256 – 265. (in Chinese)

[4] Chu E H, Li S, Xie H L, et al. RDCL three-phase inverter and load adaptive commutation control[J]. IET Power Electronics, 2019, 12(3): 505 – 514.

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



李 森 男, 1993 年 4 月出生于河北省张家口市, 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: 1752425267@qq.com