

辅助电路损耗低的并联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: 为使逆变器工作在高效率状态, 本文设计了辅助电路损耗低的并联谐振直流环节逆变器, 仅在直流环节电压上升的过程中, 触发位于直流环节的辅助电路的谐振; 在直流环节电压下降过程中和负载电流瞬时值较低时, 辅助电路不发生谐振, 这有利于实现辅助电路的低功耗. 说明了电路的工作流程. 实验波形显示出开关器件取得了软切换. 因此, 该电路结构有利于优化逆变器效率.

关键词: 逆变器; 直流环节; 辅助电路; 零电压切换; 低功耗; 谐振

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2022)11-2813-04

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

DOI: 10.12263/DZXB.20200021

Parallel Resonant DC Link Inverter with Low-Loss Auxiliary Circuit

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 realize efficient work of the inverter, a parallel resonant dc link inverter with low-loss auxiliary circuit is proposed. The resonance of the auxiliary circuit on the dc link is triggered only in the rising process of the voltage across the dc link. In the descending process of the voltage across the dc link, or when the instantaneous value of load current is low, the auxiliary circuit does not resonate, which is beneficial to realizing the low-loss of the auxiliary circuit. The working process of the circuit is illustrated. The experimental results show that the switching device has achieved soft switching. Therefore, this topology structure is instrumental in optimizing the efficiency of the inverter.

Key words: inverter; DC(Direct Current) link; auxiliary circuit; zero-voltage switching; low-loss; resonance

1 引言

谐振直流环节逆变器主要包含箝位谐振直流环节逆变器和并联谐振直流环节逆变器这两个研究方向. 并联谐振直流环节逆变器能在任意时刻触发谐振, 而且可采用各种脉冲调制策略. 因此, 并联谐振直流环节逆变器是更有意义的研究方向. 科研人员在近些年已设计出多种并联谐振直流环节逆变器拓扑结构, 但是仍有不足之处有待完善. 文献[1~4]提出的拓扑结构在全负载范围内, 需要辅助电路在每个开关周期的直流母线电压上升和下降过程都处于谐振状态, 特别是在负载电流瞬时值较低的开关周期内, 会导致辅助电路损耗高于减小的开关损耗, 不利于优化逆变器的效率.

本文设计了一种并联谐振直流环节逆变器, 相比于其他同类型拓扑结构, 具有以下创新之处: 在每个开关

周期内, 辅助电路仅在直流母线电压的上升过程中处于谐振状态, 在直流母线电压的下降过程中辅助电路不处于谐振状态, 是通过谐振电容向负载释放电能来实现直流母线电压下降, 而且在负载电流瞬时值较低时, 辅助电路将不参与换流过程, 通过减少辅助电路在每个开关周期的工作次数来实现辅助电路的低功耗和优化逆变器效率. 文中将阐述电路换流过程, 最后, 以实验波形来证实该逆变器的开关器件可完成软切换.

2 电路拓扑结构和工作流程说明

2.1 电路拓扑结构

图 1 为主电路, 其包含直流电源, 辅助谐振电路以及三相逆变电路. 在触发辅助电路谐振以后, 能使逆变器桥臂输入端的电压形成短时的零状态, 主开关可处

于零电压软切换,限制了开关损耗。

流程说明中假定每个开关周期中逆变器输出端接恒流源,其电流值为 I_0 ,而且 $I_{0min} \leq I_0 \leq I_{0max}$ 时,辅助谐振电路参与换流过程.图2显示出逆变器等效电路及电压和电流的正向,图3显示出电路的理论工作波形,图4显示出各工作流程等效电路图。

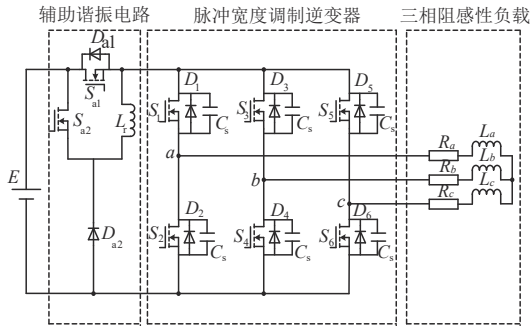


图1 辅助电路损耗低的并联谐振直流环节逆变器主电路

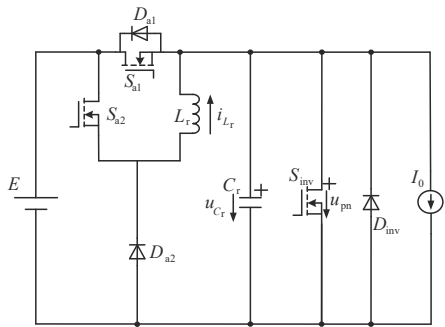
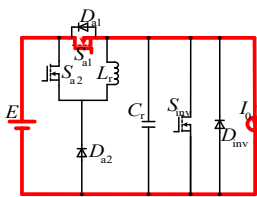


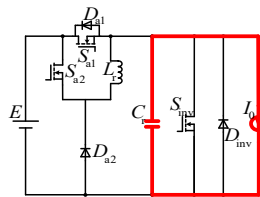
图2 逆变器的等效电路

2.2 工作流程

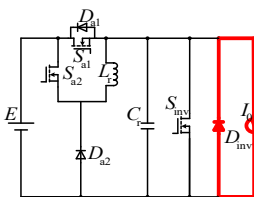
流程1($t \sim t_0$):稳态电流流过辅助开关 S_{a1} ,无电流流过辅助电路,逆变器稳定工作。



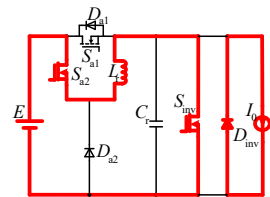
(a) 流程1



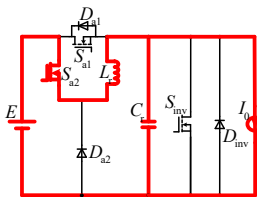
(b) 流程2



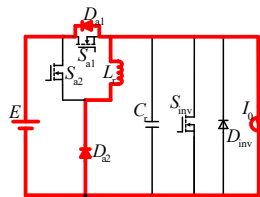
(c) 流程3



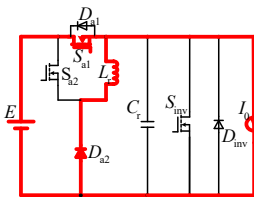
(d) 流程4



(e) 流程5



(f) 流程6



(g) 流程7

图4 各工作流程的等效电路图

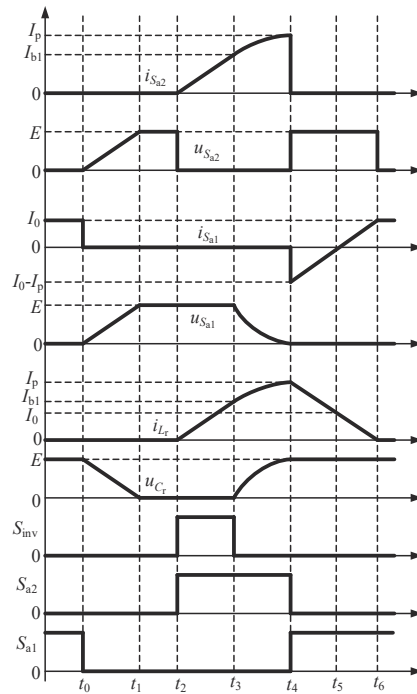


图3 谐振换流期间的理论工作波形

流程2($t_0 \sim t_1$):在 t_0 时刻, S_{a1} 的触发脉冲切换为低电平,等效谐振电容 C_r 限制了 S_{a1} 的端电压 $u_{S_{a1}}$ 的增大速度, S_{a1} 完成了零电压软关断.然后, C_r 只向负载放电, C_r 的端电压 u_{C_r} 以恒定速度减小,在 t_1 时刻,当 $u_{C_r}=0$ 时,流程2结束。

流程3($t_1 \sim t_2$):直流母线电压 u_{pn} 保持为零状态,逆变器的主开关能完成零电压软切换。

流程4($t_2 \sim t_3$):在 t_2 时刻,开通辅助开关 S_{a2} ,谐振电感 L_r 限制了流过 S_{a2} 的电流 $i_{S_{a2}}$ 的增大速度, S_{a2} 处于零电流软开通切换。 S_{a2} 开通以后, L_r 吸收电能,流过 L_r 的电流

i_{L_r} 从零开始以恒定的速度增大,在 t_3 时刻, i_{L_r} 等于 I_{b1} , 流程 4 结束.

流程 5 ($t_3 \sim t_4$): 从 t_3 时刻开始, L_r 和 C_r 进入谐振状态, L_r 和 C_r 吸收电能. i_{L_r} 和 u_{C_r} 处于增大状态. 在 t_4 时刻, 当 u_{C_r} 变化到 E , i_{L_r} 变化到最大值 I_p 时, 流程 5 结束.

流程 6 ($t_4 \sim t_5$): 在 t_4 时刻, S_{a1} 的触发脉冲切换为高电平, S_{a2} 的触发脉冲切换为低电平. 因为 $i_{L_r}(t_4) = I_p > I_0$, 所以从 t_4 时刻开始, 电流通过 D_{a1} 流通, 所以 S_{a1} 完成了零电压软开通. 电流流过 D_{a1} 时, L_r 两端电压等于 E , i_{L_r} 从 I_p 开始以恒定的速度减小. 在 t_5 时刻, 当 i_{L_r} 等于 I_0 时, D_{a1} 关断, 流程 6 结束.

流程 7 ($t_5 \sim t_6$): 在 t_5 时刻, i_{L_r} 从 I_0 开始继续处于以恒定速度衰减状态, 电流流过 S_{a1} . 在 t_6 时刻, 当 i_{L_r} 变化到零时, 流程 7 结束, 然后电路再回到流程 1.

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 $E = 300 \text{ V}$, 负载电感 $L_a = L_b = L_c = 1 \text{ mH}$, 负载电阻 $R_a = R_b = R_c = 10 \Omega$, 缓冲电容 $C_s = 10 \text{ nF}$, 等效电容 $C_r = 30 \text{ nF}$, 辅助电路处于谐振状态的最大和最小负载电流分别为 $I_{0\max} =$

16 A 和 $I_{0\min} = 3 \text{ A}$, 输出相电压有效值 $U_1 = 85 \text{ V}$, 辅助开关 S_{a2} 的触发脉冲占空比 $\rho_{S_{a2}}$ 为 0.0641, 开关频率 $f_c = 20 \text{ kHz}$. 辅助开关 S_{a1} 和桥臂上的主开关的型号为 FMP60N105S2FD (600 V/29.2 A), 辅助开关 S_{a2} 的型号为 FMP60N088S2HF (600 V/32.8 A).

在一个开关周期内, u_{C_r} 与 i_{L_r} 的实验波形如图 5(a) 所示, 符合图 3 所示理论波形的变化趋势, 验证了电路工作过程符合流程说明. $u_{S_{a1}}$ 和 $i_{S_{a1}}$ 的实验波形如图 5(b), 波形显示出 $u_{S_{a1}}$ 增大较慢, S_{a1} 在进行关断动作时处于零电压软关断状态; 波形同时显示出 $i_{S_{a1}}$ 降低前, $u_{S_{a1}}$ 先变化为零, S_{a1} 在进行开通动作时处于零电压软开通状态. $u_{S_{a2}}$ 和 $i_{S_{a2}}$ 的实验波形如图 5(c) 所示, 波形显示出 $i_{S_{a2}}$ 增大较慢, S_{a2} 在进行开通动作时处于零电流软开通状态; 图 5(d) 和图 5(e) 分别给出了在满载和轻载时的 $u_{S_{a1}}$ 和 $i_{S_{a1}}$ 的实验波形, 波形显示出 $i_{S_{a1}}$ 增大前, $u_{S_{a1}}$ 先变化为零, S_{a1} 在进行开通动作时处于零电压软开通状态; 波形同时显示出 $u_{S_{a1}}$ 增大较慢, S_{a1} 在进行关断动作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 50 Hz, 电流波形显示出了较好的正弦形状, 逆变器处于稳定工作状态.

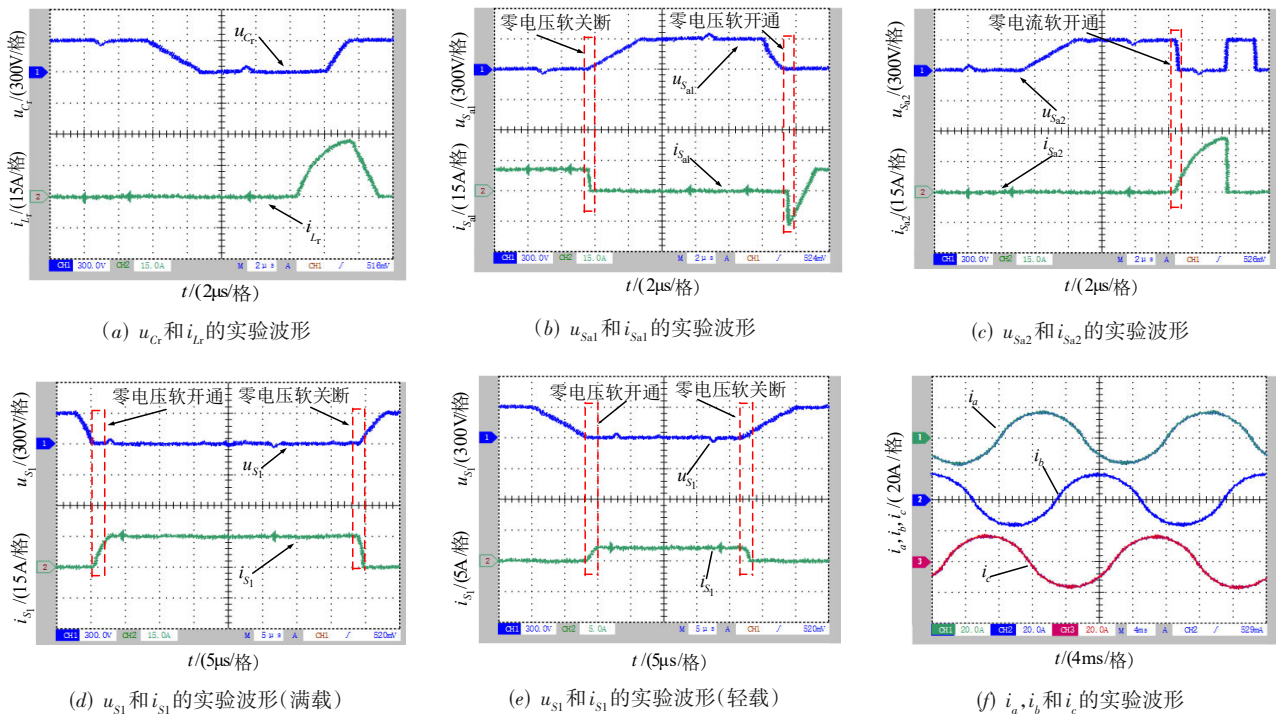


图 5 实验波形

4 结论

设计出了辅助电路损耗低的新型并联谐振直流环节逆变器, 相比于其他并联谐振直流环节逆变器的最显著创新是辅助电路在直流母线电压下降过程中不处

于谐振状态, 同时在负载电流瞬时值较小时, 辅助电路不参与换流过程, 有利于实现辅助电路实现低功耗. 依据实验波形得出结论: (1) 主开关和直流母线上的辅助开关都取得软切换; (2) 逆变器三相负载电流波形保持

了较好的正弦形状,辅助电路对于逆变器的正常工作无负面影响。

本文提出的拓扑结构待完善之处是直流母线之间的辅助开关没有实现软关断,但是当该辅助开关采用可快速关断的 MOSFET 时,能有效限制该辅助开关的关断损耗。此外,该辅助开关没有实现软关断是因为辅助电路处于谐振状态时,流过谐振电感的电流需要流过该辅助开关来续流,谐振结束之后,流过该辅助开关的电流仍然存在,这时要立刻关断该辅助开关将谐振电感中的电能回馈给直流电源,所以该辅助开关不能实现零电流软关断。

参考文献

- [1] CHU Enhui, LI Si, XIE Haolin, et al. RDCL three-phase inverter and load adaptive commutation control[J]. IET Power Electronics, 2019, 12(3): 505-514.
- [2] 王强,李森,王天施,等. 新型三相谐振直流环节逆变器[J]. 电子学报, 2021, 49(8): 1641-1644.
WANG Qiang, LI Sen, WANG Tian-shi, et al. Novel three-phase resonant DC link inverter[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(8): 1641-1644. (in Chinese)
- [3] WANG Qiang, WANG Youzheng. Resonant DC link soft-switching inverter with low-loss auxiliary circuit[J]. International Journal of Electronics, 2019, 106(10): 1602-1615.
- [4] CHEN Yanan, 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.

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