

节能型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: 为改善逆变器的运行效率, 提出了一种节能型三相谐振直流环节软开关逆变电路, 在直流环节增设了辅助电路. 当主开关需要切换时, 提前使辅助电路进入谐振状态, 将直流环节电压变化到零, 保证主开关完成零电压软切换, 并且辅助开关也能完成软切换. 通过控制辅助开关切换的间隔时间来调节直流环节电压保持为零的时间, 使逆变器能根据需要来调整脉宽调制策略. 详细说明了电路的工作过程. 实验结果表明逆变器主开关和辅助开关能完成软切换. 因此, 该拓扑结构对于研发高性能谐振直流环节逆变器具有借鉴意义.

关键词: 逆变器; 直流环节; 谐振; 软开关; 效率

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)09-1860-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.09.025

An Energy-Saving Resonant DC Link Inverter

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: An energy-saving three-phase resonant DC (Direct Current) link soft-switching inverter is proposed to improve efficiency of the inverter. The auxiliary circuit is added on the DC link of the inverter. When the main switches need to be operated, auxiliary circuit enters into the resonance state in advance. The voltage across DC link changes to zero so that the main switches can achieve zero-voltage soft switching. Besides, the auxiliary switch can also achieve soft switching. By controlling the interval time of the operation of the auxiliary switches, the zero-state duration of the DC link voltage can be adjusted so that various flexible pulse width modulation strategies can be applied in the inverter. The workflow of the inverter is analyzed. The experimental results show that the main switch and the auxiliary switch can achieve soft switching. Therefore, the topology is of reference for the development of high-performance resonant DC link inverters.

Key words: inverter; DC link; resonance; soft-switching; efficiency

1 引言

工业化发展对逆变器开关频率的要求日趋严格, 硬开关逆变器在较高开关频率下的开关损耗和发热量都会明显增加, 而且电路中较大的电压和电流变化率会带来严重的电磁干扰, 这都是实现逆变器高频化的绊脚石. 为克服以上缺点, 研究人员提出了具有辅助谐振电路的软开关逆变器, 能使开关器件实现软切换, 有利于提高开关频率, 降低开关损耗和电磁干扰.

在位于逆变器直流环节的辅助谐振电路的作用下, 直流环节电压周期性下降到零, 使开关器件完成软

切换的逆变器被称为谐振直流环节逆变器^[1-5], 近些年多种该类型逆变器的拓扑结构被提出, 但是仍需改进. 例如文献[1]提出的逆变器设置了含有大电容和耦合电感的箝位电路, 导致直流环节稳态电压高于直流电源电压, 这需要使用价格较高的耐高压开关器件, 不利于降低硬件成本; 文献[2~5]提出的逆变器在谐振电流阈值确定为常数以后, 不能调节直流环节电压保持为零的时间, 不利于逆变器根据需要来调整脉宽调制策略.

本文提出了一种新的节能型谐振直流环节软开关逆变器, 其优势是(1)直流环节稳态电压不高于直流电

收稿日期: 2018-10-11; 修回日期: 2019-08-07; 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)

(3) 流程3($t_1 \sim t_2$): 在 t_1 时刻, 关断 S_{DC} , 电容 C_s 限制了 S_{DC} 发生关断动作时的电压上升速度, 因此 S_{DC} 在关断时处于零电压软关断状态. S_{DC} 关断以后, L_r 、 C_r 和 C_s 进入谐振状态, C_s 放电, u_{C_s} 逐渐减小, L_r 和 C_r 被充电, i_{L_r} 和 u_{C_r} 逐渐增大, 当 u_{C_s} 减小到和 u_{C_r} 相等时, i_{L_r} 达到最大值. 在 t_2 时刻, u_{C_s} 减小到零, 流程3 结束. 本流程中 C_s 除了给 L_r 和 C_r 充电外, 同时还向负载放电, 以维持负载电流不变.

(4) 流程4($t_2 \sim t_3$): 在 t_2 时刻, L_r 和 C_r 处于串联谐振状态, L_r 进行放电, i_{L_r} 逐渐变小, C_r 被充电, u_{C_r} 逐渐变大. 同时 D_{INV} 导通, 以维持负载电流不变. 在 t_3 时刻, i_{L_r} 减小到零, 流程4 结束.

(5) 流程5($t_3 \sim t_4$): 在 t_3 时刻, 关断 S_{r1} , 在 S_{r1} 关断前, 因为流过 S_{r1} 的电流已经等于零, 所以 S_{r1} 在关断时处于零电流软关断状态. 电流流过 D_{INV} 以维持负载电流不变. 本流程持续时间 T_5 可以通过控制 S_{r1} 的关断动作到 S_{r2} 的开通动作的间隔时间来调节, 所以可以通过控制 T_5 的大小来调节直流环节零电压持续时间.

(6) 流程6($t_4 \sim t_5$): 在 t_4 时刻, 开通 S_{r2} 和 S_{INV} , L_r 限制了 S_{r2} 开通时电流上升速度, 因此 S_{r2} 发生开通动作时处于零电流软开通状态. S_{r2} 开通以后, L_r 和 C_r 发生串联谐振, C_r 放电, u_{C_r} 逐渐减小, L_r 被充电, i_{L_r} 反向变化至设定的反向阈值 I_{p3} 时, 流程6 结束.

(7) 流程7($t_5 \sim t_6$): 在 t_5 时刻, 关断 S_{INV} , 此时 C_r 、 C_s 和 L_r 发生谐振, C_r 放电, u_{C_r} 逐渐减小, C_s 和 L_r 被充电, i_{L_r} 增大, 同时 u_{C_s} 逐渐增大. 当 u_{C_s} 增大到和 u_{C_r} 相等时, i_{L_r} 反向变化到最大值. 当 u_{C_r} 逐渐减小到零时, 流程7 结束. C_r 除了给 L_r 和 C_s 充电外, 同时还向负载放电, 以维持负载电流不变.

(8) 流程8($t_6 \sim t_7$): 在 t_6 时刻, D_r 自然导通. L_r 和 C_s 处于谐振状态, L_r 放电, C_s 被充电, u_{C_s} 逐渐变大, L_r 同时也向负载放电, 以维持负载电流不变. 在 t_7 时刻, 当 u_{C_s} 增大到 U_{dc} 时, 流程8 结束.

(9) 流程9($t_7 \sim t_8$): 在 t_7 时刻, S_{DC} 的两端电压等于零, 此时开通 S_{DC} , 则 S_{DC} 发生开通动作时处于零电压软开

通状态. L_r 继续放电, L_r 向电源回馈电能, 同时还向负载放电, 以维持负载电流不变. 直到 i_{L_r} 等于 I_0 时, D_c 自然关断, 电源通过 S_{DC} 向负载提供电能, 直到 i_{L_r} 等于零时, 流程9 结束, 同时关断 S_{r2} , 因为在 S_{r2} 关断前, 流过 S_{r2} 的电流先减小为零, 所以 S_{r2} 完成了零电流软关断动作.

3 实验结果

样机参数如下: 额定输出功率 $P_0 = 4.5 \text{ kW}$, 直流电源电压 $U_{dc} = 300 \text{ V}$, 负载电阻 $R_a = R_b = R_c = 7.5 \Omega$, 最大负载电流为 $I_{0\text{max}} = 20 \text{ A}$, 谐振电感 $L_r = 10 \mu\text{H}$, 谐振电容 $C_r = 0.33 \mu\text{F}$, 缓冲电容 $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 33 \text{ nF}$, 负载电感 $L_a = L_b = L_c = 1 \text{ mH}$, 开关频率 $f_c = 20 \text{ kHz}$.

S_{DC} 发生切换动作时电压 $u_{S_{DC}}$ 和电流 $i_{S_{DC}}$ 的实验波形如图5(a)所示, 由波形图得出 S_{DC} 发生关断动作时, $u_{S_{DC}}$ 的变化率较低, S_{DC} 关断时处于零电压软关断状态; 同时可以得出 S_{DC} 发生开通动作时, 在 $i_{S_{DC}}$ 增大前, 电压 $u_{S_{DC}}$ 已经变化到零, S_{DC} 开通时处于零电压软开通状态. 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(b)所示, 由波形图得出 S_{r1} 发生开通动作时, $i_{S_{r1}}$ 的变化率较低, S_{r1} 开通时处于零电流软开通状态; 同时可以得出 S_{r1} 发生关断动作时, 在 $u_{S_{r1}}$ 增大前, $i_{S_{r1}}$ 已经变化到零, S_{r1} 关断时处于零电流软关断状态. 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(c)所示, 由波形图得出 S_{r2} 发生开通动作时, $i_{S_{r2}}$ 的变化率较低, 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, $u_{S_{r2}}$ 增大前, $i_{S_{r2}}$ 已经变化为零, S_{r2} 关断时处于零电流软关断状态. 图5(d)给出了逆变器上桥臂的主开关 S_1 发生切换动作时的电压 u_{S_1} 和电流 i_{S_1} 的实验波形, 由图5(d)得出 S_1 发生开通动作时, 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; 由图5(d)同时可以得出 S_1 发生关断动作时, u_{S_1} 以较低的变化率增大, S_1 关断时处于零电压软关断状态.

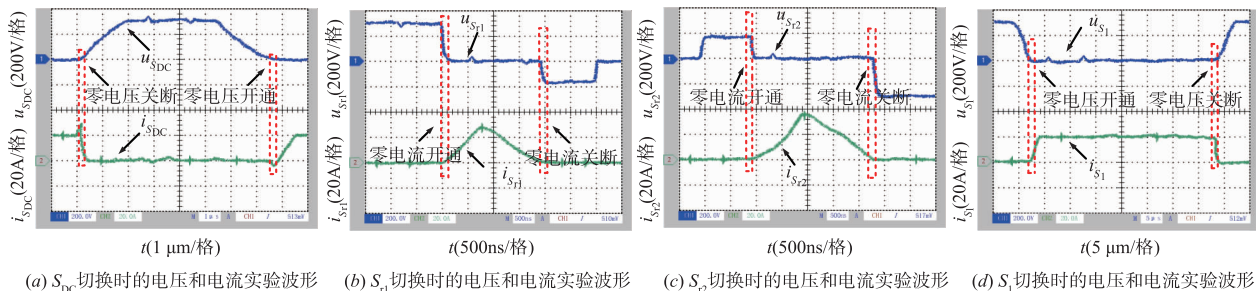


图5 实验波形

4 结论

设计了一种新的节能型谐振直流环节软开关逆变器,对比同类型的软开关逆变器,其明显优势是直流环节稳态电压不高于直流电源电压,而且可以调节直流环节电压保持为零的时间,使逆变器能根据需要来调整脉宽调制策略.经实验验证得到的结论是逆变器主开关实现了零电压开关,辅助开关也可以分别实现零电流开关和零电压开关.本文的研究成果对于提高谐振直流环节逆变器的实用性具有重要参考价值.

参考文献

- [1] 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 Qiang, Hu Fei, Wang Tianshi, 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)
- [2] Wang Qiang, Wang Youzheng. Resonant DC link soft-switching inverter with low-loss auxiliary circuit[J]. Inter-

national Journal of Electronics, 2019, 106(10): 1602-1615.

- [3] 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 Qiang, Liu Yansong, Chen Xiangxue, 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)
- [4] 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 Qiang, Xing Yan. Soft switching voltage source inverter with parallel resonant DC link[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(11): 2317-2320. (in Chinese)
- [5] 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 Qiang, Liu Yansong, Chen Xiangxue, et al. Parallel resonant DC link inverter with low-loss auxiliary circuit[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(7): 1369-1373. (in Chinese)

作者简介



王 强(通讯作者) 男,1981年10月出生,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