

## 新型三相谐振极软开关逆变器

王 强<sup>1,2</sup>, 徐有万<sup>1,2</sup>, 王天施<sup>1,2</sup>, 刘晓琴<sup>1,2</sup>

(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:** 为提高三相逆变器的转换效率, 提出了一种新型三相谐振极软开关逆变器拓扑结构, 通过在每相桥臂上增加结构简单的辅助电路, 实现了主开关的零电压软开通和零电流软关断. 逆变器主开关采用金属氧化物半导体场效应晶体管(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET)或者绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)时, 都能实现无损耗切换, 解决了 MOSFET 内部结电容造成的容性开通损耗问题和 IGBT 拖尾电流造成的关断损耗问题. 分析了电路的工作过程, 实验结果表明开关器件完成了软切换. 因此, 该拓扑结构对于提高逆变器的性能具有重要意义.

**关键词:** 逆变器; 谐振极; 软开关; 零电压开通; 零电流关断

**中图分类号:** TM464      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2019)06-1373-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.06.026

## Novel Three-Phase Resonant Pole Soft-Switching Inverter

WANG Qiang<sup>1,2</sup>, XU You-wan<sup>1,2</sup>, WANG Tian-shi<sup>1,2</sup>, LIU Xiao-qin<sup>1,2</sup>

(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:** To improve the conversion efficiency of the three-phase inverter, a novel topology of three-phase resonant pole soft-switching inverter is proposed. By adding a simple auxiliary circuit on each phase of the bridge arm, the main switches realize zero-voltage turn-on and zero-current turn-off. Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) or Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) which is used as the main switch of the inverter could realize the lossless switching, so as to solve the problem of capacitive turn-on loss caused by the MOSFET internal junction capacitance and the turn-off loss caused by the IGBT trailing current. This paper analyzes the working process of the circuit. The experimental results show that the switching devices achieve soft-switching. Therefore, the topology is of great importance to improve the performance of the inverter.

**Key words:** inverter; resonant pole; soft-switching; zero-voltage turn-on; zero-current turn-off

### 1 引言

软开关技术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. 谐振直流环节软开关逆变器利用位于逆变器直流环节的辅助谐振电路使直流母线电压周期性变化为零来实现主开关的软切换<sup>[1,2]</sup>, 但是直流环节电压周期性下降到零会影响到逆变器的直流电压利用率, 使逆变器有较大的输出谐波. 谐振极软开关逆变器的辅助谐振电路位于逆变器的各相桥臂上<sup>[3-5]</sup>, 不是利用直流环节的零电压来实现

软开关, 这不会影响直流电压利用率. 因此, 谐振极软开关逆变器在近些年受到越来越多的关注.

文献[3]提出的谐振极软开关逆变器的辅助电路都不含辅助开关, 辅助电路通过限制开关器件开通瞬间的电流变化率和关断瞬间的电压变化率来降低开关损耗, 不能做到开关损耗完全等于零. 文献[4,5]提出的谐振极软开关逆变器的辅助电路都含辅助开关, 其中文献[4]提出的拓扑结构中, 主开关在开通瞬间能完成零电压软开通, 实现了开通损耗等于零, 但是主开关

收稿日期: 2017-12-29; 修回日期: 2018-04-17; 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)

在关断瞬间是通过限制电压变化率来降低关断损耗,不能做到关断损耗完全等于零;文献[5]提出的拓扑结构中,主开关在关断瞬间能完成零电流软关断,实现了关断损耗等于零,但是主开关在开通瞬间是通过限制电流变化率来降低开通损耗,不能做到开通损耗完全等于零.逆变器通常使用 MOSFET 或 IGBT 作为开关器件,因为 MOSFET 内部存在结电容,会产生容性开通损耗问题,所以实现零电压软开通对于 MOSFET 更有意义;又因为 IGBT 在关断时存在拖尾电流造成的关断损耗问题,所以实现零电流软关断对于 IGBT 更有意义.

本文提出一种新型三相谐振极软开关逆变器拓扑结构,其显著特点是逆变器主开关既能完成零电压软开通,又能完成零电流软关断,逆变器主开关真正实现了开关损耗等于零,而且 MOSFET 和 IGBT 都能适用于该软开关逆变器的主开关,拓宽了主开关器件的选型范围.本文分析了电路的工作过程,最终在一台 3kW 的三相实验样机上验证了该三相谐振极软开关逆变器的有效性.

## 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.1 个谐振电容,1 个谐振电感和 2 个辅助开关及其反并联二极管组成了每相桥臂的辅助电路,且各相的辅助谐振电路相互独立.当逆变器某一相桥臂上的主开关需要开通时,利用该相桥臂的辅助谐振电路使该主开关两端电压先减小为零,然后开通主开关,主开关能实现零电压软开通动作;当逆变器某一相桥臂上的主开关需要关断时,利用该相桥臂的辅助谐振电路使流过该主开关的电流先减小为零,然后关断主开关,主开关能实现零电流软关断动作.

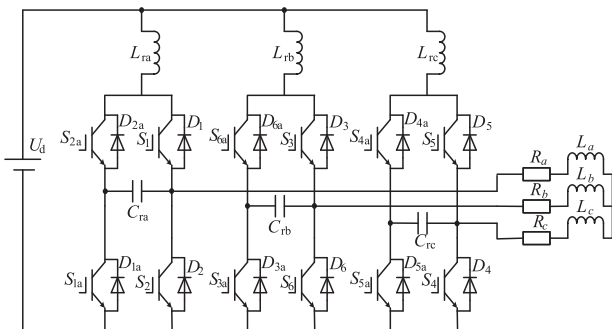


图1 新型三相谐振极软开关逆变器主电路

### 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.每个开关周期的工作过程包含 11 个流程,图 3 给出了电路的特征波形,图 4 为各流程等效电路图.

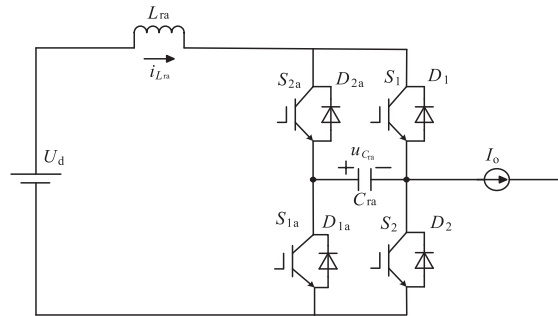


图2 新型三相谐振极软开关逆变器的单相等效电路

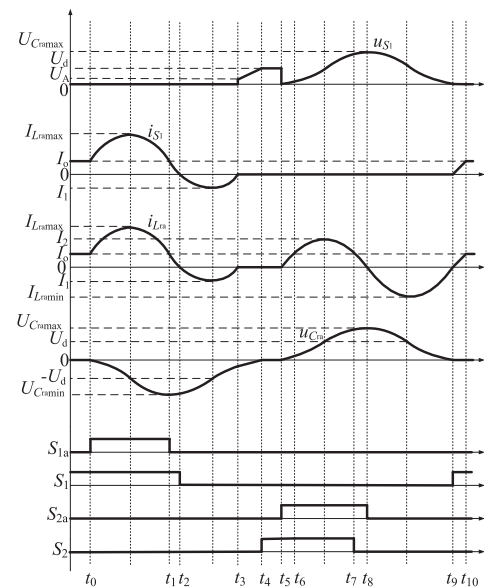


图3 谐振换流期间的理论工作波形

(1) 流程 1 ( $t \sim t_0$ ): 电流流过主开关  $S_1$ , 没有电流流过其它开关器件, 此时谐振电容  $C_{ra}$  两端电压  $u_{Cra}$  等于零, 流过谐振电感  $L_{ra}$  的电流  $i_{Lra}$  等于负载电流  $I_0$ , 电路处于稳态.

(2) 流程 2 ( $t_0 \sim t_1$ ): 在  $t_0$  时刻, 开通辅助开关  $S_{1a}$ ,  $L_{ra}$  限制了  $S_{1a}$  发生开通动作时的电流上升速度, 因此  $S_{1a}$  在开通时处于零电流软开通状态.  $S_{1a}$  开通之后,  $L_{ra}$  与  $C_{ra}$  进入谐振状态,  $i_{Lra}$  从  $I_0$  开始正向增大,  $u_{Cra}$  从零开始反向增大, 当  $u_{Cra}$  反向增大到与直流电源电压  $U_d$  相等时,  $i_{Lra}$  正向增大到最大值  $I_{Lramax}$ , 然后  $i_{Lra}$  开始处于正向减小的过程,  $u_{Cra}$  继续处于反向增大的过程, 在  $i_{Lra}$  变化到与  $I_0$  相等的  $t_1$  时刻,  $u_{Cra}$  到达反向最大值  $U_{Cramin}$ , 流过  $S_{1a}$  的电流等于零, 流程 2 结束.

(3) 流程 3 ( $t_1 \sim t_2$ ): 在  $t_1$  时刻, 关断  $S_{1a}$ , 因为此时

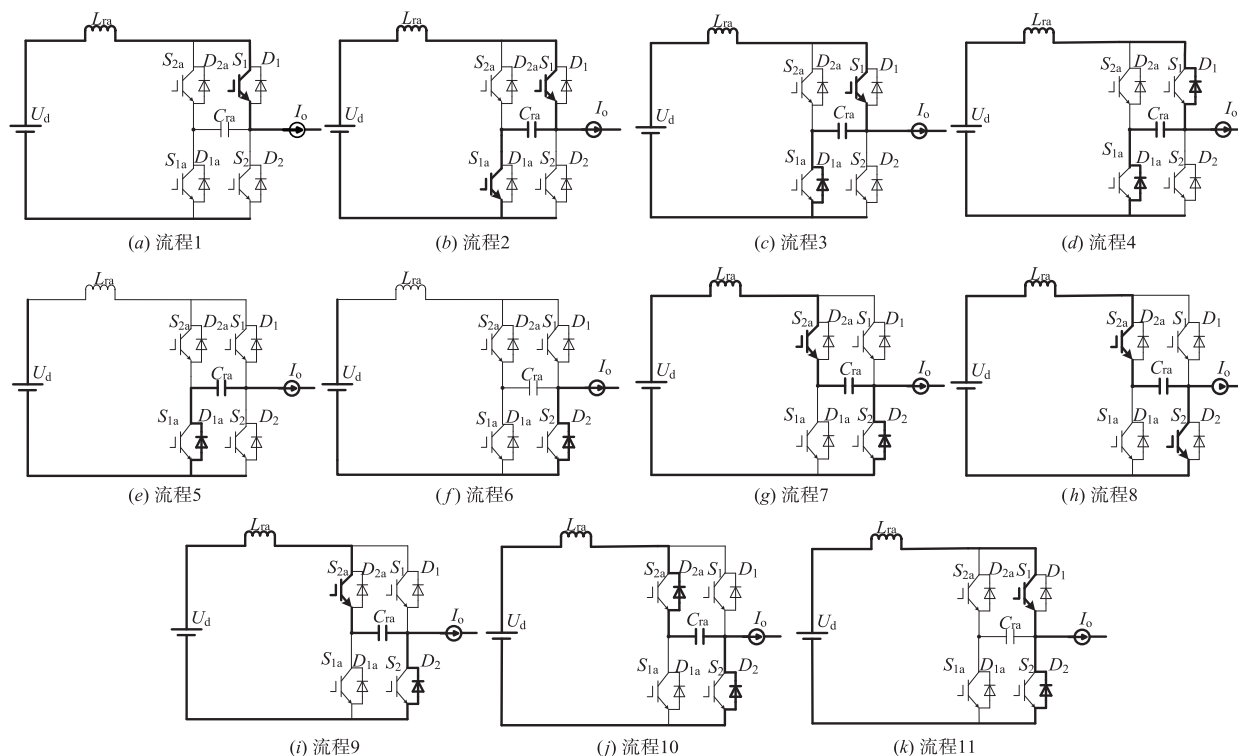


图4 各工作流程的等效电路图

流过  $S_{1a}$  的电流已经等于零,所以  $S_{1a}$  在关断时处于零电流软关断状态.在该流程中  $L_{ra}$  与  $C_{ra}$  继续处于谐振状态,  $i_{Lra}$  继续从  $I_o$  开始减小,  $u_{Cra}$  开始反向减小.在  $t_2$  时刻,  $i_{Lra}$  变化到零,流程 3 结束.

(4) 流程 4 ( $t_2 \sim t_3$ ): 在  $t_2$  时刻,关断  $S_1$ ,因为此时流过  $S_1$  的电流已经等于零,所以  $S_1$  在关断时处于零电流软关断状态.在该流程中,  $L_{ra}$  与  $C_{ra}$  仍然处于谐振状态,  $i_{Lra}$  从零开始反向增大,  $u_{Cra}$  继续反向减小,当  $u_{Cra}$  反向减小到与直流电源电压  $U_d$  相等时,  $i_{Lra}$  反向增大到最大值  $-I_1$ ,然后  $i_{Lra}$  和  $u_{Cra}$  都处于反向减小的过程,在  $t_3$  时刻,  $i_{Lra}$  再一次变化到零,  $D_1$  自然关断,  $L_{ra}$  与  $C_{ra}$  的谐振状态结束,流程 4 结束.

(5) 流程 5 ( $t_3 \sim t_4$ ): 在该流程中,流过  $C_{ra}$  的电流与负载电流  $I_o$  相等,  $u_{Cra}$  处于反向线性减小的过程,当  $u_{Cra}$  变化到零时,  $D_{1a}$  自然关断,流程 5 结束.

(6) 流程 6 ( $t_4 \sim t_5$ ): 在  $t_4$  时刻,负载电流  $I_o$  开始通过  $D_2$  续流,此时开通主开关  $S_2$ ,因为  $S_2$  两端电压等于零,所以  $S_2$  在开通时处于零电压软开通状态.在该流程中辅助电路停止工作,电路处于稳态.

(7) 流程 7 ( $t_5 \sim t_6$ ): 在  $t_5$  时刻,开通辅助开关  $S_{2a}$ ,  $L_{ra}$  限制了  $S_{2a}$  发生开通动作时的电流上升速度,因此  $S_{2a}$  在开通时处于零电流软开通状态.  $S_{2a}$  开通之后,  $L_{ra}$  与  $C_{ra}$  进入谐振状态,  $i_{Lra}$  和  $u_{Cra}$  都从零开始正向增大,当  $i_{Lra}$  增大到与负载电流  $I_o$  相等时,流过  $D_2$  的电流减小到零,

$D_2$  自然关断,流程 7 结束.

(8) 流程 8 ( $t_6 \sim t_7$ ): 从  $t_6$  时刻开始,电流开始流过  $S_2$ ,  $L_{ra}$  与  $C_{ra}$  继续处于谐振状态,  $i_{Lra}$  和  $u_{Cra}$  继续处于正向增大过程,当  $u_{Cra}$  正向增大到与直流电源电压  $U_d$  相等时,  $i_{Lra}$  正向增大到最大值  $I_2$ ,然后  $i_{Lra}$  开始处于正向减小的过程,  $u_{Cra}$  继续处于正向增大的过程,在  $i_{Lra}$  再次变化到与  $I_o$  相等的  $t_7$  时刻,流过  $S_2$  的电流变化到零,流程 8 结束.

(9) 流程 9 ( $t_7 \sim t_8$ ): 在  $t_7$  时刻,关断  $S_2$ ,因为此时流过  $S_2$  的电流已经等于零,所以  $S_2$  在关断时处于零电流软关断状态.然后电流开始流过  $D_2$ ,  $L_{ra}$  与  $C_{ra}$  继续处于谐振状态,  $i_{Lra}$  继续处于正向减小的过程,  $u_{Cra}$  继续处于正向增大的过程,在  $i_{Lra}$  变化到零的  $t_8$  时刻,  $u_{Cra}$  到达正向最大值  $U_{Cra\max}$ ,流过  $D_2$  的电流增大到  $I_o$ ,流程 9 结束.

(10) 流程 10 ( $t_8 \sim t_9$ ): 在  $t_8$  时刻,关断  $S_{2a}$ ,因为此时流过  $S_{2a}$  的电流已经等于零,所以  $S_{2a}$  在关断时处于零电流软关断状态.在该流程中,电流开始流过  $D_{2a}$ ,  $L_{ra}$  与  $C_{ra}$  仍然处于谐振状态,  $i_{Lra}$  从零开始反向增大,  $u_{Cra}$  开始从峰值正向减小,当  $u_{Cra}$  正向减小到与  $U_d$  相等时,  $i_{Lra}$  反向增大到最大值  $-I_{Lra\min}$ ,此时流过  $D_{2a}$  的电流等于  $I_3$ ,然后  $i_{Lra}$  处于反向减小的过程,  $u_{Cra}$  处于正向减小的过程,在  $t_9$  时刻,  $i_{Lra}$  再一次变化到零,  $D_{2a}$  自然关断,  $u_{Cra}$  也变化到零,  $L_{ra}$  与  $C_{ra}$  的谐振状态结束,  $I_o$  通过  $D_2$  续流,流程 10 结束.

(11) 流程 11 ( $t_9 \sim t_{10}$ ): 在  $t_9$  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, 然后直流电源电压直接施加在  $L_{ra}$  两端,  $L_{ra}$  处于充电状态,  $i_{Lra}$  开始正向线性增加, 在  $t_{10}$  时刻, 当  $i_{Lra}$  增大到与  $I_o$  相等时, 流过  $D_2$  的电流变化为零,  $D_2$  实现了自然关断, 流程 11 结束。

至此, 1 个开关周期内的电路工作流程分析完毕, 然后电路返回流程 1, 进入下 1 个开关周期的工作。

### 3 实验结果

图 1 所示的三相实验样机参数如下: 额定输出功率  $P_0 = 3\text{kW}$ , 三相负载电阻  $R_a = R_b = R_c = 10\Omega$ , 三相负载电感  $L_a = L_b = L_c = 0.8\text{mH}$ , 直流电源电压  $U_d = 290\text{V}$ ,  $S_{1a}, S_{3a}$  和  $S_{5a}$  的触发脉冲占空比为  $\rho_{S_{1a}} = \rho_{S_{3a}} = \rho_{S_{5a}} = 0.034$ ,  $S_{2a}, S_{6a}$  和  $S_{4a}$  的触发脉冲占空比为  $\rho_{S_{2a}} = \rho_{S_{6a}} = \rho_{S_{4a}} = 0.035$ , 最大负载电流  $I_{o\max} = 14\text{A}$ , 开关频率  $f_c = 20\text{kHz}$ , 输出频率  $f_o = 50\text{Hz}$ , 三相谐振电感  $L_{ra} = L_{rb} = L_{rc} = 10\mu\text{H}$ , 三相谐振电容  $C_{ra} = C_{rb} = C_{rc} = 0.033\mu\text{F}$ , 死区

时间  $\Delta = 2.5\mu\text{s}$ 。

相关的实验波形如图 5 所示, 实验波形中的电压和电流取的正方向与图 2 中的标注一致. 图 5(a) 和图 5(b) 分别给出了在满载和轻载下, 逆变器上桥臂主开关  $S_1$  进行切换动作时的端电压  $u_{S_1}$  和流过的电流  $i_{S_1}$  的实验波形, 从图 5(a) 和图 5(b) 可以看出  $u_{S_1}$  增大之前,  $i_{S_1}$  已经等于零, 所以轻载和满载时都实现了  $S_1$  的零电流软关断; 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, 所以轻载和满载时都实现了  $S_1$  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  $i_{S_{1a}}, i_{S_{2a}}$  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,  $i_{S_{1a}}$  和  $i_{S_{2a}}$  以较低变化率正向增大, 实现了  $S_{1a}$  和  $S_{2a}$  的零电流软开通; 从图 5(c) 和图 5(d) 还能看出在  $S_{1a}$  和  $S_{2a}$  关断之前, 没有电流流过  $S_{1a}$  和  $S_{2a}$ , 实现了  $S_{1a}$  和  $S_{2a}$  的零电流软关断。

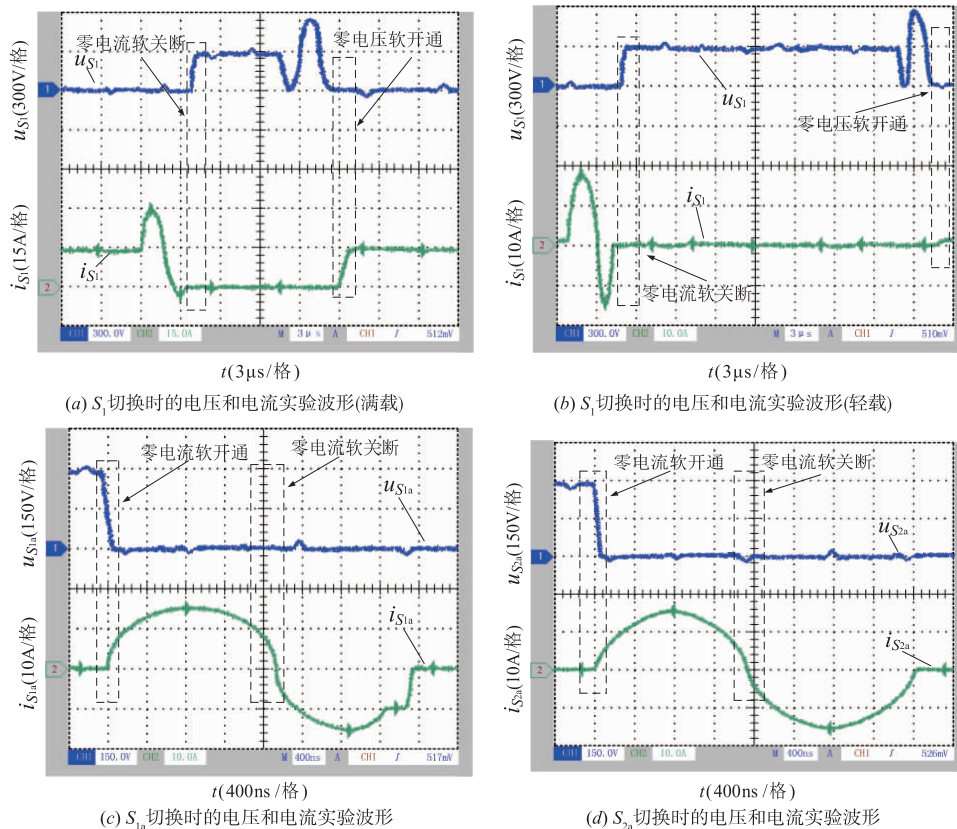


图5 实验波形

### 4 结论

与同类型的三相谐振极软开关逆变器相比较, 本文设计的拓扑结构的突出优点是主开关既能完成零电压软开通, 又能完成零电流软关断, 主开关真正实现了

开关损耗等于零, 使软开关逆变器对于不同类型的开关器件都具有通用性, 而且辅助电路结构简单, 易于控制. 实验结果证明在轻载和满载时, 逆变器器主开关可以完成零电压软开通动作和零电流软关断动作, 而且辅助开关可以完成零电流软开通动作和零电流软关断

动作. 本文的研究成果对于提高三相谐振极软开关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] 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)
- [3] He Xiangning, Chen Alian, Wu Hongyang, et al. Simple passive lossless snubber for high-power multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 890 - 899.
- [4] Chu Enhui, Wu Mengyang, Huang Liang, et al. Research on a novel modulation strategy for auxiliary resonant commutated pole inverter with the smallest loss in auxiliary commutation circuits[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1103 - 1117.
- [5] Yong Li, Lee F C, Boroyevich D. A simplified three-phase zero-current-transition inverter with three auxiliary switches[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 802 - 813.

#### 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



徐有万 男, 1994年4月出生于江苏省淮安市, 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: 1004098042@qq.com