

# 高效率单相全桥零电流开关谐振极逆变器

王 强<sup>1,2</sup>, 王有政<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:** 为改善单相全桥逆变器的效率, 提出了一种新型高效率单相全桥零电流开关谐振极逆变器拓扑结构. 在桥臂上的辅助谐振电路参与换流的过程中, 逆变器的开关器件可实现零电流软关断. 当开关器件为绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)时, IGBT实现零电流软关断可使其拖尾电流导致的关断损耗等于零, 有利于改善以IGBT作为开关器件的单相全桥逆变器的效率. 分析了电路工作流程. 实验结果显示出开关器件完成了零电流软切换动作. 因此, 对于研发以IGBT作为开关器件的高效率单相全桥逆变器, 该拓扑结构具有一定的参考价值.

**关键词:** 逆变器; 桥臂; 高效率; 谐振; 零电流开关; 拖尾电流

**中图分类号:** TM464      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2021)04-0788-04

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.12263/DZXB.20190656

## High-Efficiency Single-Phase Full-Bridge Zero-Current Switching Resonant Pole Inverter

WANG Qiang<sup>1,2</sup>, WANG You-zheng<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:** In order to improve the efficiency of single-phase full-bridge inverter, a topology of high efficiency single-phase full-bridge zero-current switching resonant pole inverter is proposed. When the auxiliary resonant circuit on the bridge arm works in commutation process of the inverter, the switching devices of the inverter can realize zero-current turn-off. When the switching device is insulated gate bipolar transistor (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT), zero-current turn-off of IGBT can make the turn-off loss caused by trailing current be equal to zero, which is beneficial to improving the efficiency of single-phase full-bridge inverter with IGBT as switching devices. The working process of the circuit is studied. The experimental results show that the switching devices realize zero-current soft-switching. Therefore, the topology has certain reference value for the research and development of high efficiency single-phase full-bridge inverter with IGBT as switching device.

**Key words:** inverter; bridge arm; high-efficiency; resonance; zero-current switch; tail current

## 1 引言

随着功率变换器的广泛应用和实际生产对功率变换器性能的要求提高, 需要进一步提升功率变换器的开关器件的切换频率. 但是过高的开关频率不仅会使开关器件产生大量损耗, 还能产生电磁干扰. 为了解决器件性能与高频化之间的矛盾, 软开关谐振电力变换技术应运而生.

根据辅助谐振电路在逆变器中的位置, 软开关逆变器主要分为谐振直流环节逆变器和谐振极逆变器这两种类型. 研究人员已设计出多种单相全桥谐振极逆变器拓扑结构, 但是仍然需要优化. 文献[1~4]提出的拓扑结构是通过降低逆变器桥臂上的主开关器件在发生关断动作时的端电压变化速度来完成开关器件的零电压软关断动作, 当具有拖尾电流的IGBT被作为逆变器的开关器件时, 必将产生关断损耗. 此外, 在文献[1

~4]提出的拓扑结构中,工作于换流过程的开关器件承受的电压都不低于直流电源电压。

本文提出了一种高效率单相全桥零电流开关谐振极逆变器,具有如下优势:(1)在每个开关周期中,参与换流过程的 2 个主开关和 2 个辅助开关承受的电压不超过直流电源电压的一半,显著降低了换流过程中的开关器件承受电压值;(2)逆变器所有开关器件能完成零电流软关断动作,使 IGBT 拖尾电流产生的关断损耗等于零,有利于高性能的 IGBT 应用到逆变器中作为开关器件.文中将分析电路在 1 个开关周期内的工作流程,通过实验来证明该逆变器的有效性.

## 2 电路工作流程分析

### 2.1 电路结构

本文提出的新型高效率单相全桥零电流开关谐振极逆变器主电路拓扑如图 1 所示.主电路由三部分构成.第一部分是直流电源  $U_d$ ;第二部分是由主开关  $S_1 \sim S_4$  及其反并联二极管  $D_1 \sim D_4$ ,负载电感  $L$  和负载电阻  $R$  组成的单相全桥逆变电路;第三部分是由 2 个谐振电容  $C_{r1}$  和  $C_{r2}$ 、2 个谐振电感  $L_{r1}$  和  $L_{r2}$ 、二极管  $D_f$ 、4 个辅助开关  $S_{1a} \sim S_{4a}$  及其反并联二极管  $D_{1a} \sim D_{4a}$  组成的辅助谐振电路.负载电流方向为图 2 所示的正方向时,逆变器所有开关均实现零电流软切换.负载电流为正方向时, $S_1, S_4, S_{1a}$  和  $S_{4a}$  参与逆变器的换流过程;负载电流为负方向时, $S_2, S_3, S_{2a}$  和  $S_{3a}$  参与逆变器的换流过程.为方便分析电路,假设负载电感值足够大,在一个开关周期内的负载电流可看作固定值,逆变器输出端可看作与恒流源相连.图 1 所示的拓扑结构可用图 2 来等效,电压和电流的正方向如图 2 所示.

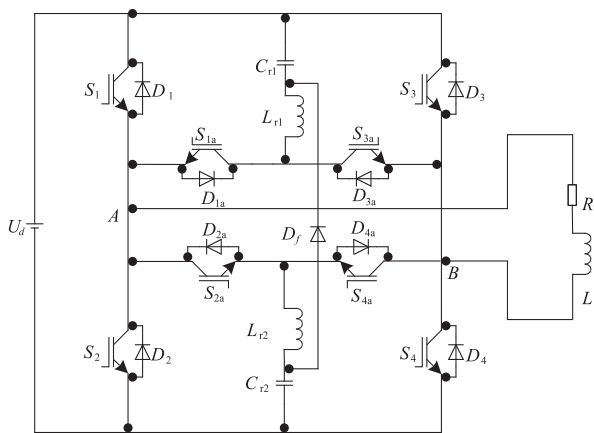


图1 新型高效率单相全桥零电流开关谐振极逆变器主电路

### 2.2 电路的工作流程

电路在每个开关周期包含 7 个工作流程,电路的特征工作波形如图 3 所示,各工作流程的等效电路图如图 4 所示.

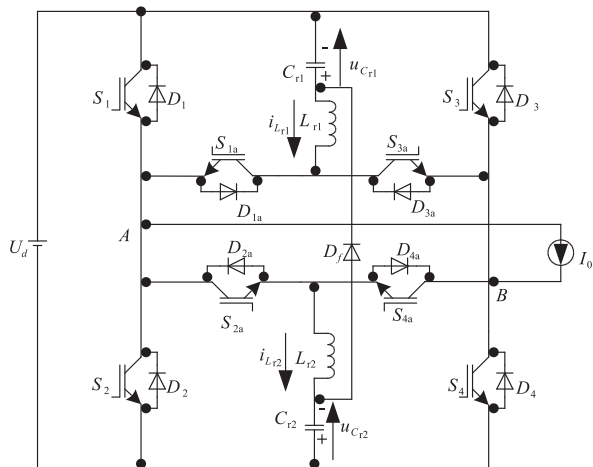


图2 新型高效率单相全桥零电流开关谐振极逆变器等效电路

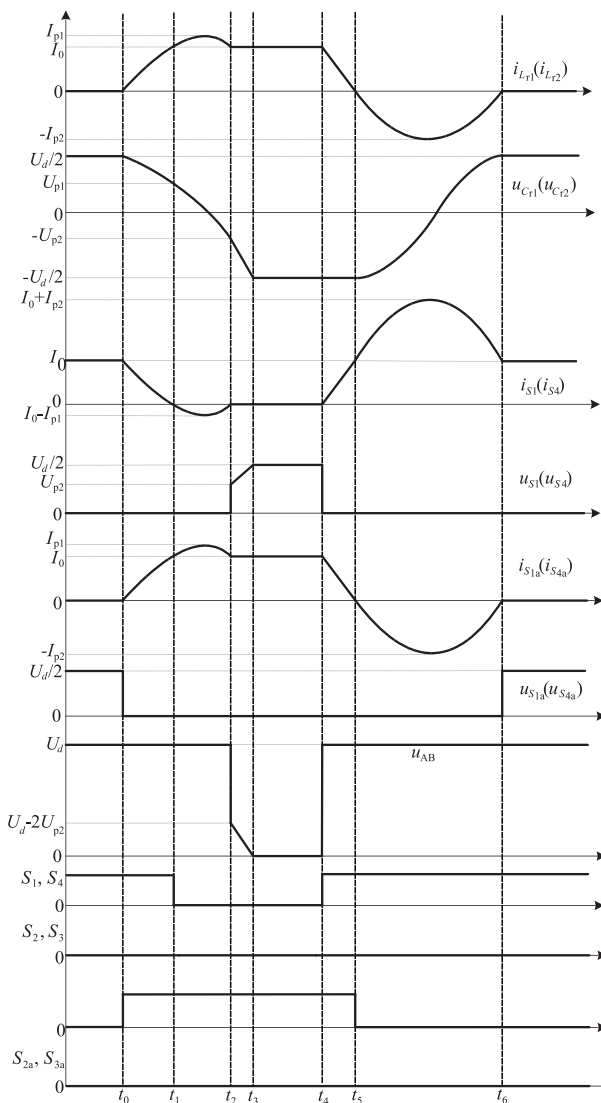


图3 谐振换流期间的理论工作波形

流程 1 ( $t \sim t_0$ ): 流过  $S_1$  和  $S_4$  的电流大小等于  $I_0$ , 此时  $C_{r1}$  和  $C_{r2}$  的两端电压  $u_{Cr1}$  和  $u_{Cr2}$  为  $U_d/2$ , 没有电流通

过辅助谐振电路,电路工作在稳定状态.

流程 2 ( $t_0 \sim t_1$ ): 在  $t_0$  时刻,同时开通  $S_{1a}$  和  $S_{4a}$ ,  $L_{r1}$  和  $L_{r2}$  分别限制了  $S_{1a}$  和  $S_{4a}$  发生开通动作时的电流上升速度,  $S_{1a}$  和  $S_{4a}$  在开通时处于零电流软开通状态.  $S_{1a}$  和  $S_{4a}$  开通之后,  $L_{r1}$ 、 $C_{r1}$  与  $L_{r2}$ 、 $C_{r2}$  同时进入谐振状态,  $C_{r1}$ 、 $C_{r2}$

处于放电状态,  $L_{r1}$ 、 $L_{r2}$  处于被充电状态,  $i_{L_{r1}}$  和  $i_{L_{r2}}$  从零开始正向增大,  $u_{C_{r1}}$  和  $u_{C_{r2}}$  从  $U_d/2$  开始正向减小. 在  $t_1$  时刻,  $u_{C_{r1}}$  和  $u_{C_{r2}}$  正向减小到  $U_{p1}$ ,  $i_{L_{r1}}$  和  $i_{L_{r2}}$  正向增大到  $I_0$  时, 流程 2 结束.

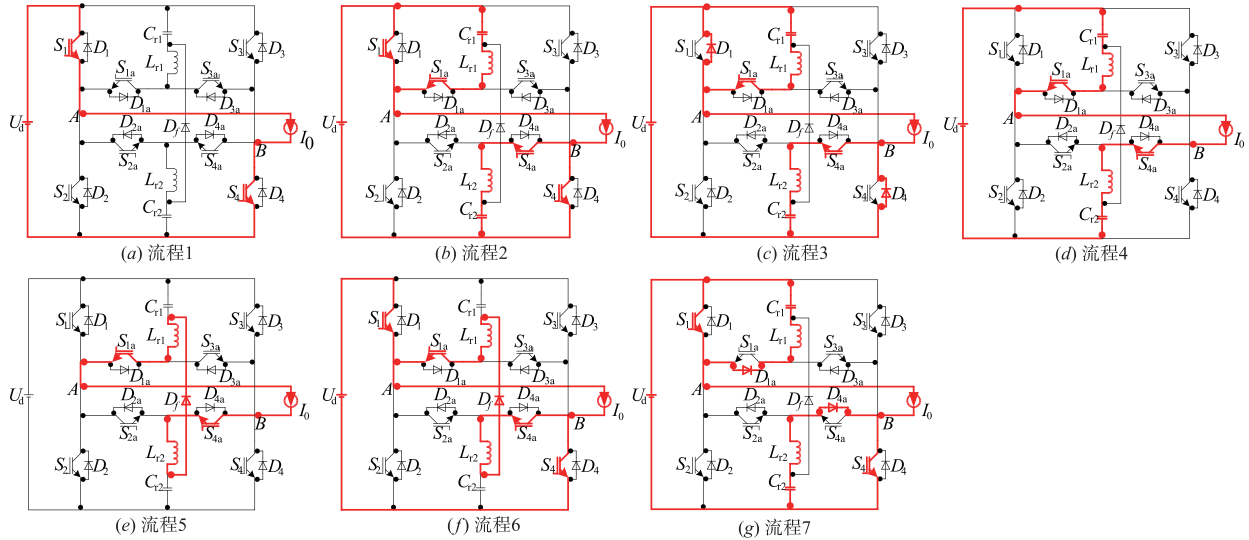


图4 各工作流程的等效电路图

流程 3 ( $t_1 \sim t_2$ ): 在  $t_1$  时刻, 关断  $S_1$  和  $S_4$ , 因为在关断前流过  $S_1$  和  $S_4$  的电流已变为零, 因此  $S_1$  和  $S_4$  实现零电流软关断. 本流程开始时, 电流流过  $D_1$  和  $D_4$ ,  $L_{r1}$ 、 $C_{r1}$  与  $L_{r2}$ 、 $C_{r2}$  继续处于谐振状态,  $L_{r1}$ 、 $L_{r2}$  处于被充电状态,  $C_{r1}$ 、 $C_{r2}$  处于放电状态,  $i_{L_{r1}}$  和  $i_{L_{r2}}$  从  $I_0$  开始继续正向增大,  $u_{C_{r1}}$  和  $u_{C_{r2}}$  从  $U_{p1}$  开始正向减小. 当  $u_{C_{r1}}$  和  $u_{C_{r2}}$  减小到零时,  $i_{L_{r1}}$  和  $i_{L_{r2}}$  增加到正向最大值  $I_{p1}$ , 然后  $L_{r1}$ 、 $L_{r2}$  开始处于放电状态,  $C_{r1}$ 、 $C_{r2}$  处于被充电状态,  $i_{L_{r1}}$  和  $i_{L_{r2}}$  从  $I_{p1}$  开始正向减小,  $u_{C_{r1}}$  和  $u_{C_{r2}}$  从零开始反向增大. 在  $t_2$  时刻,  $i_{L_{r1}}$  和  $i_{L_{r2}}$  正向减小到  $I_0$ ,  $u_{C_{r1}}$  和  $u_{C_{r2}}$  反向增大到  $U_{p2}$ ,  $D_1$  和  $D_4$  截止时, 流程 3 结束.

流程 4 ( $t_2 \sim t_3$ ): 该流程中,  $i_{L_{r1}}$  和  $i_{L_{r2}}$  始终为  $I_0$ . 从  $t_2$  时刻开始,  $C_{r1}$ 、 $C_{r2}$  处于被充电状态,  $u_{C_{r1}}$  和  $u_{C_{r2}}$  从  $-U_{p2}$  开始反向线性增加, 在  $t_3$  时刻, 当  $u_{C_{r1}}$  和  $u_{C_{r2}}$  反向增大到  $U_d/2$ ,  $D_1$  端电压为零时, 流程 4 结束.

流程 5 ( $t_3 \sim t_4$ ): 在  $t_3$  时刻,  $I_0$  开始通过  $D_1$ 、 $L_{r1}$ 、 $S_{1a}$ 、 $S_{4a}$ 、 $L_{r2}$  所在的回路进行续流,  $u_{C_{r1}}$  和  $u_{C_{r2}}$  始终为  $-U_d/2$ , 辅助电路不发生谐振, 电路处于稳态.

流程 6 ( $t_4 \sim t_5$ ): 在  $t_4$  时刻, 开通  $S_1$  和  $S_4$ ,  $L_{r1}$ 、 $L_{r2}$  限制了  $S_1$  和  $S_4$  发生开通动作时的电流上升速度, 因此  $S_1$  和  $S_4$  在开通时处于零电流软开通状态. 该流程中,  $u_{C_{r1}}$  和  $u_{C_{r2}}$  始终为  $-U_d/2$ . 从  $t_4$  时刻开始,  $L_{r1}$ 、 $L_{r2}$  处于放电状态,  $i_{L_{r1}}$  和  $i_{L_{r2}}$  从  $I_0$  开始正向线性减小. 当  $i_{L_{r1}}$  和  $i_{L_{r2}}$  减小到零,  $D_1$  自然关断时, 流程 6 结束.

流程 7 ( $t_5 \sim t_6$ ): 在  $t_5$  时刻, 关断  $S_{1a}$  和  $S_{4a}$ , 因为在关断  $S_{1a}$  和  $S_{4a}$  前, 流过其电流已为零, 因此  $S_{1a}$  和  $S_{4a}$  实现了零电流软关断. 从  $t_5$  时刻开始,  $L_{r1}$ 、 $C_{r1}$  与  $L_{r2}$ 、 $C_{r2}$  同时进入谐振状态,  $C_{r1}$ 、 $C_{r2}$  处于放电状态,  $L_{r1}$ 、 $L_{r2}$  处于被充电状态,  $i_{L_{r1}}$  和  $i_{L_{r2}}$  从零开始反向增大,  $u_{C_{r1}}$  和  $u_{C_{r2}}$  从  $-U_d/2$  开始反向减小. 当  $u_{C_{r1}}$  和  $u_{C_{r2}}$  反向减小到零时,  $i_{L_{r1}}$  和  $i_{L_{r2}}$  增大到反向最大值  $I_{p2}$ . 然后,  $L_{r1}$ 、 $L_{r2}$  开始处于放电状态,  $C_{r1}$ 、 $C_{r2}$  处于被充电状态,  $i_{L_{r1}}$  和  $i_{L_{r2}}$  从  $-I_{p2}$  开始反向减小,  $u_{C_{r1}}$  和  $u_{C_{r2}}$  从零开始正向增加. 在  $t_6$  时刻,  $i_{L_{r1}}$  和  $i_{L_{r2}}$  正向减小到零,  $u_{C_{r1}}$  和  $u_{C_{r2}}$  正向增大到  $U_d/2$ ,  $D_{1a}$  和  $D_{4a}$  截止时, 流程 7 结束, 然后电路返回流程 1, 开始下一个开关周期的工作.

### 3 实验验证

样机参数如下: 额定输出功率  $P_0 = 3\text{kW}$ , 负载电阻  $R = 15\Omega$ , 负载电感  $L = 1\text{mH}$ , 直流电源电压  $U_d = 400\text{V}$ , 最大负载电流  $I_{0\text{max}} = 15\text{A}$ , 开关频率  $f_c = 20\text{kHz}$ , 输出频率  $f_0 = 50\text{Hz}$ , 谐振电感  $L_{r1} = L_{r2} = 5\mu\text{H}$ , 谐振电容  $C_{r1} = C_{r2} = 15\text{nF}$ .

在满载和轻载时,  $S_1$  动作时的端电压  $u_{S_1}$  和流过的电流  $i_{S_1}$  的实验波形分别如图 5(a) 和图 5(b) 所示. 从图 5(a) 和图 5(b) 可以看出流过  $S_1$  的电流的上升的速度被抑制, 所以轻载和满载时都实现了  $S_1$  的零电流软开通; 从图 5(a) 和图 5(b) 还可以看出  $u_{S_1}$  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。 $S_{1a}$  动作时的端电压  $u_{s_{1a}}$  和电流  $i_{s_{1a}}$  的实验波形如图 5(c) 所示。从图 5(c) 可以看出  $S_{1a}$  开通时,  $i_{s_{1a}}$  以较低

变化率正向增大,实现了  $S_{1a}$  零电流软开通;从图 5(c) 还可以看出  $u_{s_{1a}}$  增大之前,  $i_{s_{1a}}$  已经等于零,所以实现了  $S_{1a}$  的零电流关断。

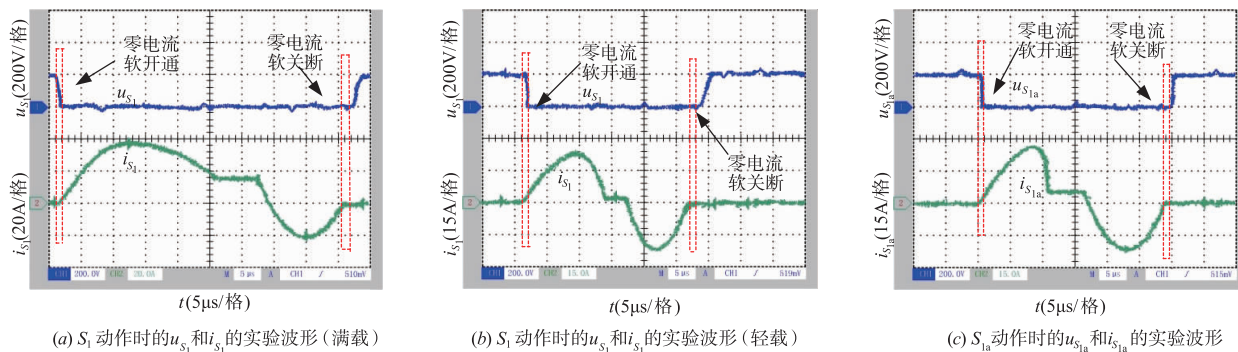


图5 实验波形

## 4 结论

设计出了一种高效率单相全桥零电流开关谐振极逆变器,相比于同类型的单相全桥谐振极逆变器的显著优势是参与换流过程的开关器件承受电压不超过直流电源电压的一半,开关器件均能实现零电流软切换,有利于高性能的 IGBT 作为逆变器的开关器件。经实验验证得到结论:在换流过程中,主开关和辅助开关都能完成零电流软切换。但是该拓扑结构仍存在以下不足之处:辅助二极管承受电压达到了直流电源电压的 2 倍;每个开关周期中的未参与换流过程的 2 个辅助开关承受电压达到了直流电源电压的 1.5 倍;在换流过程中,谐振电流将流过桥臂上的主开关器件,使主开关的电流定额增大,在开关频率提高时,主开关的通态损耗也会增大。这需要在以后的研究工作中来进一步改进以上不足之处。

## 参考文献

[1] 寇宝泉,张海林,张赫,等.改进型零电压转换 PWM 软开关功率变换器的实现机理分析[J].电工技术学报,

2017,32(14):116-126.

Kou Baoquan, Zhang Hailin, Zhang He, et al. The analysis of a novel zero-voltage-transition PWM soft-switching power converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(14): 116-126. (in Chinese)

[2] Wang Chien-ming, Su Ching-hung, Jiang Maoh-chin, et al. A ZVS-PWM single-phase inverter using a simple ZVS-PWM commutation cell[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(2): 758-766.

[3] 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.

[4] 王强,岳远韶,王天施,等.节能型单相全桥谐振极逆变器[J].电子学报,2019,47(6):1216-1219.

Wang Qiang, Yue Yuan-shao, Wang Tian-shi, et al. An energy-saving single-phase full-bridge resonant pole inverter[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(6): 1216-1219. (in Chinese)

## 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



王有政 男,1997 年 3 月出生于辽宁省本溪市,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:18341314116@163.com