

# 节能型三相桥式零电流开关整流器

王 强<sup>1,2</sup>, 陈 俊<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:** 为使三相桥式整流器实现节能运行, 提出了一种节能型三相桥式零电流开关整流器拓扑结构, 在各相桥臂上的辅助谐振电路处于工作状态时, 整流器的开关器件能完成零电流软关断. 三相桥式整流器通常以绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 作为开关器件, 实现零电流软关断能消除 IGBT 拖尾电流产生的关断损耗. 分析了电路工作过程, 在三相 3kW 样机上的实验结果表明开关器件实现了零电流软切换. 因此, 该拓扑结构可实现以 IGBT 作为开关器件的三相桥式整流器的节能运行.

**关键词:** 节能; 整流器; 辅助电路; 零电流关断; 拖尾电流

**中图分类号:** TM464

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2020)07-1403-04

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

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.07.021

## Energy-Saving Three-Phase Bridge Zero-Current Switching Rectifier

WANG Qiang<sup>1,2</sup>, CHEN Jun<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 achieve energy-saving operation of three-phase bridge rectifier, the topology of an energy-saving three-phase bridge zero-current switching rectifier is proposed. The switching devices of the rectifier can achieve zero-current turn off when the auxiliary resonant circuit on the bridge arm of each phase is in the working state. Three-phase bridge rectifier usually uses insulated gate bipolar transistor (IGBT) as switching devices and the realization of zero-current turn off can eliminate the switching loss caused by tail current of IGBT. The working process of the circuit is analyzed. The experimental results on a three-phase 3kW prototype show that the switching devices achieve zero-current soft-switching. Therefore, this topology can achieve the energy-saving operation of three-phase bridge rectifier which uses IGBT as switching devices.

**Key words:** energy-saving; rectifier; auxiliary circuit; zero-current turn off; tail current

## 1 引言

近年来,随着现代工业技术的迅猛发展,对功率变换器的性能提出了更高的要求,小型化和模块化普遍成为发展趋势,然而传统硬开关整流器由于开关损耗大,功率变换器的开关频率仍然受到很大的限制,并且随着开关频率的提升,器件应力、开关损耗和电磁干扰等问题更为突出.基于软开关技术的功率变换器在提高开关频率的同时,有效地降低了开关损耗,减小了设备体积,提高了稳定性,其优越的性能在电力电子领域受到普遍关注.

研究人员已提出了多种三相桥式软开关整流器拓扑结构<sup>[1-4]</sup>,文献[1~4]中的桥臂上的主开关都需要并联

缓冲电容,在辅助电路运行时,主开关并联的缓冲电容的电压在每个开关周期都能减小到零,主开关能实现零电压软关断,可减小开关损耗.但是三相桥式整流器常采用 IGBT 作为开关器件,IGBT 在关断时会出现拖尾电流,利用辅助电路来实现零电压软关断不能消除拖尾电流造成的关断损耗,不利于进一步优化整流器效率.

本文提出了一种节能型三相桥式零电流开关整流器,其每相桥臂上分别并联一组辅助谐振电路,相比于其它文献提出的拓扑结构,其具有的显著优势是辅助谐振电路运行时,整流器中的主开关和辅助开关能完成零电流软开通和零电流软关断,当 IGBT 作为整流器的开关器件时,能消除 IGBT 拖尾电流产生的关断损耗,有利于优化整流器效率.文中详细分析了电路的工

收稿日期:2019-03-08;修回日期:2019-04-18;责任编辑:覃怀银

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)

作流程,最后在额定功率为 3kW 的三相实验样机上验证了该三相桥式软开关整流器的性能.

## 2 电路结构和工作流程分析

### 2.1 电路结构

该整流器主电路如图 1 所示,在交流电源输入侧串联输入升压电感  $L_a, L_b$  和  $L_c$ ,直流输出侧并联电容  $C$  和负载电阻  $R_{dc}$ ,在各相桥臂上均设置一组辅助谐振电路,由于各相辅助谐振电路之间相互独立,故选取其中一相进行分析,图 2 为单相等效电路.在图 2 中,  $S_1$  和  $S_2$  是位于整流器桥臂上的主开关,  $D_1$  和  $D_2$  是  $S_1$  和  $S_2$  的反并联二极管;设置在整流器桥臂上的辅助谐振电路包括谐振电感  $L_r$ , 谐振电容  $C_r$ , 辅助开关  $S_{x1}$  和  $S_{x2}$  及其反并联二极管  $D_{x1}$  和  $D_{x2}$ . 为简化分析,做如下假设:(1) 电路中所有元器件都工作在理想状态;(2) 在一个开关周期内,整流器输入侧的升压电感值很大,整流器输入侧的电流  $I_s$  可视为恒流源,直流侧电容  $C$  足够大,可视其电压  $U_{dc}$  恒定. 图 2 中所标注的方向为物理量参考正方向.

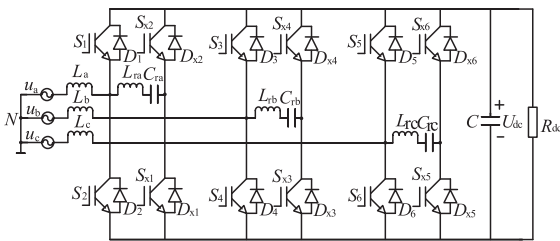


图1 节能型三相桥式零电流开关整流器主电路

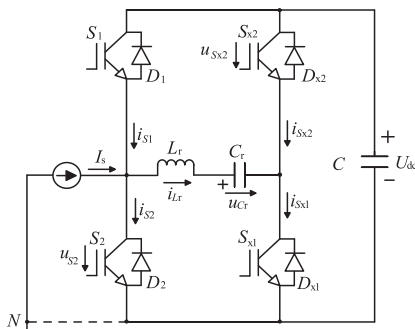


图2 节能型三相桥式零电流开关整流器的单相等效电路

### 2.2 电路的工作流程分析

流程 1 ( $t \sim t_0$ ): 电路的初始状态, 交流电流  $I_s$  通过  $D_1$  进行续流,  $S_1$  和  $S_2$  处于关断状态, 辅助电路不工作, 整流器输出电压为  $U_{dc}$ , 电路处于稳态. 此时, 流经  $L_r$  的电流  $i_{Lr}$  等于零,  $C_r$  两端电压  $u_{Cr}$  等于  $U_0$ , 其中  $0 < U_0 < U_{dc}$ . 理论工作波形如图 3 所示.

流程 2 ( $t_0 \sim t_1$ ): 在  $t_0$  时刻, 开通  $S_{x2}$ , 因其与  $L_r$  串接, 故在发生开通动作时, 流过  $S_{x2}$  的电流的变化受到限制,  $S_{x2}$  实现了零电流软开通. 从  $t_0$  时刻开始,  $L_r$  和  $C_r$  谐振,  $C_r$

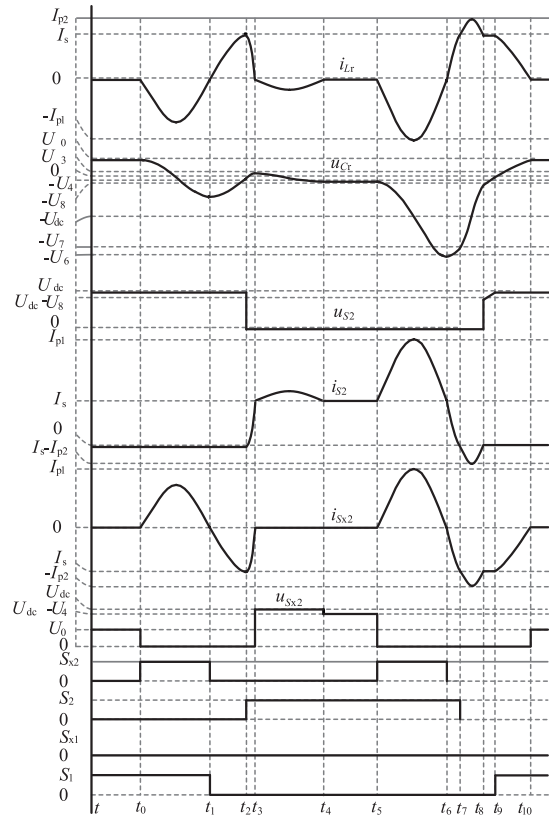


图3 电路的理论工作波形

放电,  $L_r$  被充电,  $u_{Cr}$  和  $i_{Lr}$  都逐渐减小, 同时流过  $D_1$  的电流  $i_{D1}$  从  $I_s$  逐渐增大, 其变化率与  $i_{Lr}$  的变化率相同, 当  $u_{Cr}$  减小到零时,  $i_{Lr}$  达到该阶段的反向最大值, 此后,  $L_r$  开始放电,  $C_r$  被充电,  $i_{Lr}$  逐渐增大,  $u_{Cr}$  继续减小,  $i_{D1}$  开始减小, 在  $t_1$  时刻,  $i_{Lr}$  增大到零,  $i_{D1}$  减小到输入电流  $I_s$ ,  $u_{Cr}$  减小到  $-U_1$ , 流程 2 结束.

流程 3 ( $t_1 \sim t_2$ ): 在  $t_1$  时刻, 关断  $S_{x2}$ , 因为此时流过  $S_{x2}$  的电流已经下降为零, 故  $S_{x2}$  在关断时处于零电流软关断状态. 从  $t_1$  时刻开始,  $L_r$  和  $C_r$  继续进行谐振,  $C_r$  放电,  $u_{Cr}$  逐渐增大,  $L_r$  被充电,  $i_{Lr}$  从零开始逐渐增加,  $i_{D1}$  继续减小, 在  $t_2$  时刻,  $u_{Cr}$  增大到零,  $i_{Lr}$  增加到  $I_s$ ,  $i_{D1}$  减小到零,  $D_1$  自然关断, 流程 3 结束.

流程 4 ( $t_2 \sim t_3$ ): 在  $t_2$  时刻, 开通  $S_2$ , 因其与  $L_r$  串接, 故在发生开通动作时, 流过  $S_2$  的电流  $i_{S2}$  的变化受到限制,  $S_2$  实现了零电流软开通. 从  $t_2$  时刻开始,  $L_r$  开始放电,  $C_r$  被充电,  $i_{Lr}$  从  $I_s$  开始逐渐减小,  $i_{S2}$  从零开始逐渐增加,  $u_{Cr}$  逐渐增大, 在  $t_3$  时刻,  $i_{Lr}$  减小到零,  $i_{S2}$  增大到  $I_s$ ,  $u_{Cr}$  增大到  $U_3$ , 流程 4 结束.

流程 5 ( $t_3 \sim t_4$ ): 从  $t_3$  时刻开始,  $L_r$  和  $C_r$  谐振,  $C_r$  开始放电,  $L_r$  被充电,  $u_{Cr}$  和  $i_{Lr}$  都逐渐减小, 当  $u_{Cr}$  减小到零,  $i_{Lr}$  减小到该阶段的反向最大值, 在此之后,  $L_r$  开始放电,  $C_r$  被充电,  $i_{Lr}$  逐渐增大,  $u_{Cr}$  继续减小, 在  $t_4$  时刻,  $i_{Lr}$  增大到零,  $u_{Cr}$  减小到  $-U_4$ , 流程 5 结束. 各流程等效电路如图 4 所示.

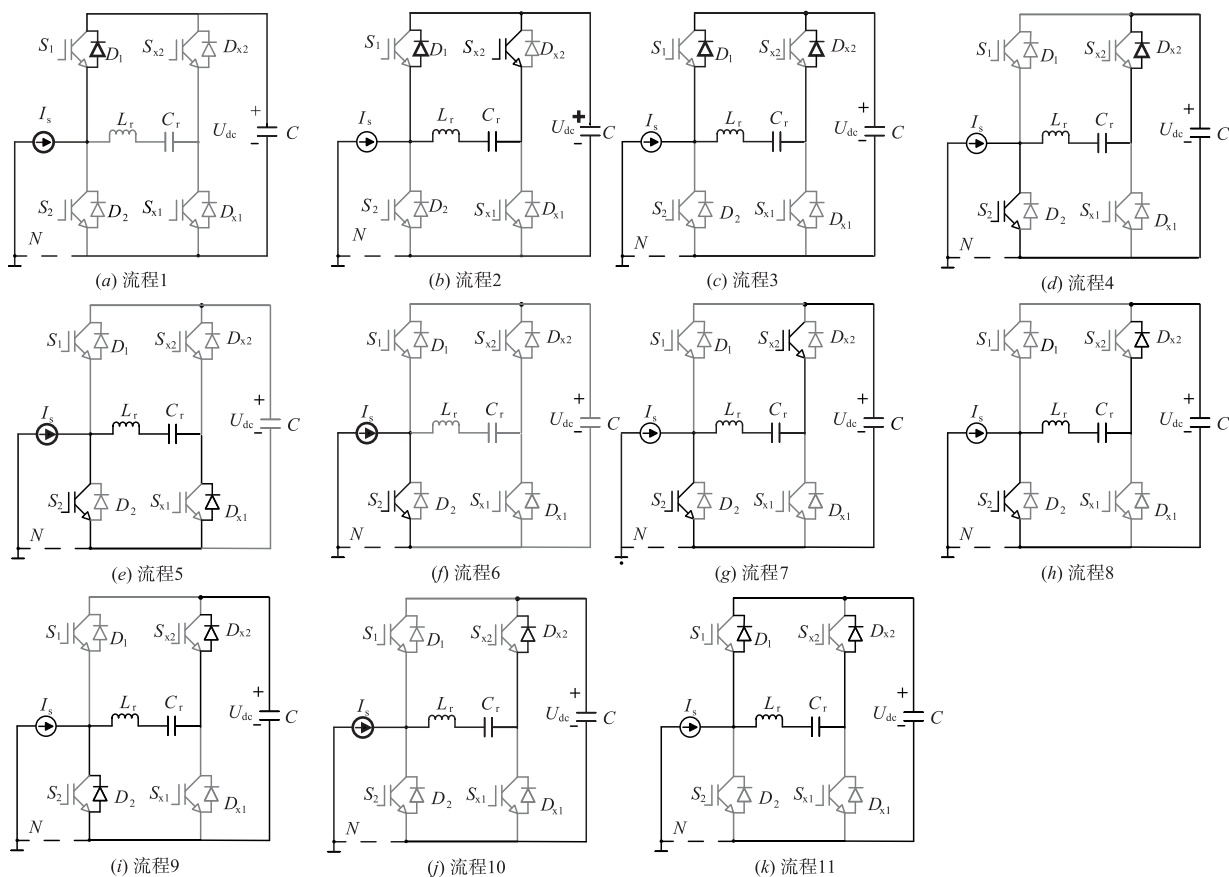


图4 各工作流程的等效电路图

流程 6 ( $t_4 \sim t_5$ ): 在此流程中, 电流  $I_s$  通过  $S_2$  续流, 电路工作在稳定状态, 辅助电路不工作, 其持续时间可按实际情况进行调节。

流程 7 ( $t_5 \sim t_6$ ): 在  $t_5$  时刻, 开通  $S_{x2}$ , 因其与  $L_r$  串接, 故在发生开通动作时, 流过  $S_{x2}$  的电流的变化受到限制,  $S_{x2}$  实现了零电流软开通。从  $t_5$  时刻开始,  $i_{L_r}$  和  $u_{C_r}$  都逐渐减小, 当  $u_{C_r}$  减小到负载电压  $-U_{dc}$  时,  $i_{L_r}$  达到反向最大值  $I_{p1}$ , 在此之后,  $L_r$  放电,  $C_r$  被充电,  $i_{L_r}$  开始增大,  $u_{C_r}$  继续减小, 在  $t_6$  时刻,  $i_{L_r}$  增大到零,  $u_{C_r}$  达到反向最大值  $U_6$ , 流程 7 结束。

流程 8 ( $t_6 \sim t_7$ ): 在  $t_6$  时刻, 关断  $S_{x2}$ , 因为此时流过  $S_{x2}$  的电流已经下降为零, 故  $S_{x2}$  在关断时处于零电流软关断状态。从  $t_6$  时刻开始,  $C_r$  与  $L_r$  谐振,  $C_r$  放电,  $L_r$  被充电,  $u_{C_r}$  开始逐渐增大,  $i_{L_r}$  继续增加, 在  $t_7$  时刻,  $i_{L_r}$  增加到  $I_s$ ,  $u_{C_r}$  增大到  $-U_7$ , 流程 8 结束。

流程 9 ( $t_7 \sim t_8$ ): 在  $t_7$  时刻, 关断  $S_2$ , 因为此时流过  $S_2$  的电流已经下降为零, 故  $S_2$  在关断时处于零电流软关断状态。从  $t_7$  时刻开始,  $D_2$  开始续流,  $C_r$  和  $L_r$  继续保持上一时刻的状态,  $C_r$  放电,  $L_r$  被充电,  $u_{C_r}$  和  $i_{L_r}$  继续增大, 当  $u_{C_r}$  增大到  $-U_{dc}$ ,  $i_{L_r}$  增大到最大值  $I_{p2}$ , 在此之后,  $L_r$  放

电,  $C_r$  被充电,  $i_{L_r}$  逐渐减小,  $u_{C_r}$  逐渐增大, 在  $t_8$  时刻,  $i_{L_r}$  减小到  $I_s$ ,  $u_{C_r}$  增大到  $-U_8$ , 流程 9 结束。

流程 10 ( $t_8 \sim t_9$ ): 在  $t_8$  时刻,  $i_{L_r}$  等于  $I_s$ ,  $i_{D_2}$  等于零,  $D_2$  自然关断, 在该阶段,  $i_{L_r}$  为恒定值,  $C_r$  被充电,  $u_{C_r}$  线性增大, 在  $t_9$  时刻,  $u_{C_r}$  增大到零, 流程 10 结束。

流程 11 ( $t_9 \sim t_{10}$ ): 在  $t_9$  时刻,  $D_1$  自然导通, 从  $t_9$  时刻开始,  $L_r$  开始放电,  $C_r$  被充电,  $i_{L_r}$  从  $I_s$  逐渐减小,  $i_{D_1}$  逐渐增大,  $u_{C_r}$  继续增大, 在  $t_{10}$  时刻,  $i_{L_r}$  减小到零,  $u_{C_r}$  增大到  $U_0$ ,  $i_{D_1}$  增大至  $I_s$ , 流程 11 结束。

### 3 实验验证

按照图 1 完成了三相实验样机的研制, 样机参数如下: 额定输出功率  $P_0 = 3\text{kW}$ , 整流器交流侧的输入相电压有效值  $U_s = 220\text{V}$ , 输入升压电感  $L = L_a = L_b = L_c = 350\mu\text{H}$ , 输出直流侧电容  $C = 720\mu\text{F}$ , 交流侧输入相电流最大值  $I_{s\text{max}} = 6.6\text{A}$ , 整流器直流侧输出额定电压  $U_{dc} = 450\text{V}$ , 主开关的开关频率  $f_c = 20\text{kHz}$ , 交流侧输入频率  $f = 50\text{Hz}$ , 死区时间  $\Delta = 2\mu\text{s}$ , 谐振电感  $L_r = L_{ra} = L_{rb} = L_{rc} = 14\mu\text{H}$ , 谐振电容  $C_r = C_{ra} = C_{rb} = C_{rc} = 10\text{nF}$ 。

图 5(a) 和图 5(b) 分别为在满载和轻载时, 主开关  $S_2$  切换时的端电压  $u_{S_2}$  和流过的电流  $i_{S_2}$  的实验波形, 从

图 5(a) 和图 5(b) 发现  $S_2$  在开通时,  $i_{s_2}$  以较低的速度发生变化, 轻载和满载时都取得了  $S_2$  的零电流软开通; 从图 5(a) 和图 5(b) 还发现  $S_2$  在关断前,  $i_{s_2}$  已经先变化到零, 故分别在轻载和满载两种情况下都取得了  $S_2$  的零电流软关断. 图 5(c) 为辅助开关  $S_{s_2}$  切换时的端电压  $u_{s_{s_2}}$  和流过该器件的电流  $i_{s_{s_2}}$  的实验波形, 可发现  $S_{s_2}$  有 2

次开通和关断过程,  $S_{s_2}$  在开通时,  $i_{s_{s_2}}$  以较低的速度发生变化,  $S_{s_2}$  实现了零电流软开通; 从图 5(c) 中还可发现  $u_{s_{s_2}}$  增大前,  $i_{s_{s_2}}$  已经变化到零, 取得了  $S_{s_2}$  的零电流软关断.

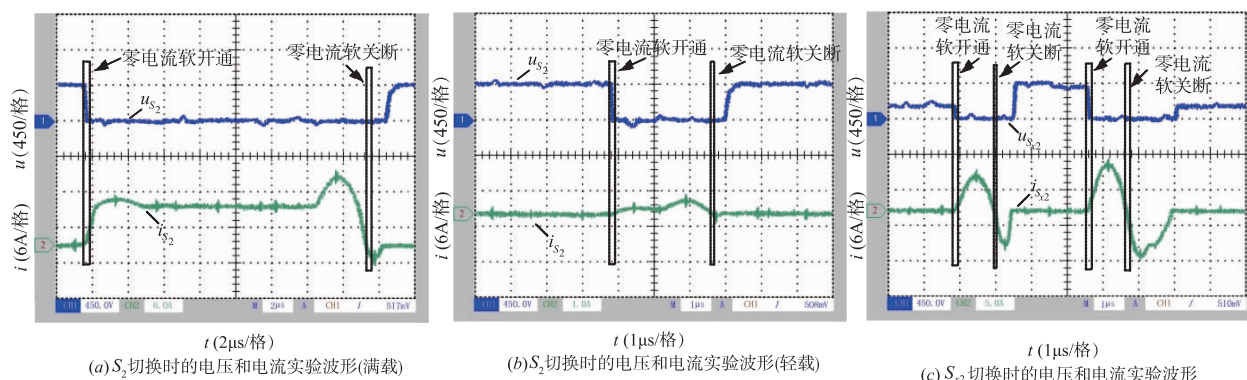


图5 实验波形

## 4 结论

本文设计了一种三相桥式零电流开关整流器, 相比于同类型的三相软开关整流器, 其显著特点是各相辅助电路结构简单, 开关器件能取得零电流软关断, IGBT 拖尾电流产生的关断损耗可等于零, 能进一步优化以 IGBT 作为开关器件的三相桥式整流器的效率. 经实验验证可得如下结论: (1) 在整流器处于轻载和满载时, 其主开关在切换过程中能取得零电流软切换; (2) 在辅助电路参与换流时, 辅助开关在切换过程中也能取得零电流软切换.

### 参考文献

- [1] Xu Dehong, Bo Feng, Li Rui, et al. A zero voltage switching SVM (ZVS-SVM) controlled three-phase boost rectifier[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 22(3): 978 - 986.
- [2] 李睿, 马智远, 徐德鸿. 一种新型 40kW 软开关三相脉宽

调制整流器[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(33): 93 - 100.

Li Rui, Ma Zhiyuan, Xu Dehong. A novel 40kW soft switching three-phase pulse width modulation rectifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(33): 93 - 100. (in Chinese)

- [3] Ma Zhiyuan, Xu Dehong, Li Rui, et al. A novel DC-side zero-voltage switching (ZVS) three-phase boost PWM rectifier controlled by an improved SVM method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4391 - 4408.
- [4] 王强, 岳远韶, 王天施, 等. 电流型零电压开关节能整流器[J]. 电子学报, 2018, 46(6): 1515 - 1518. WANG Qiang, YUE Yuan-shao, WANG Tian-shi, et al. Current-source zero-voltage switching energy-saving rectifier[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(6): 1515 - 1518. (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



陈俊 男, 1994 年 3 月出生于浙江省金华市, 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: 18358006251@163.com