

## 单相全桥三电平节能逆变器

王 强<sup>1,2</sup>, 岳远韶<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:** 随着开关频率的提高, 单相全桥逆变器处于硬开关切换时的开关损耗也会明显增大, 将导致逆变器处于低效率运行. 为解决这一问题, 提出了一种单相全桥三电平节能逆变器. 通过设置辅助换流电路, 利用谐振使主开关并联的电容的电压下降到零, 主开关可实现零电压切换, 而且在换流过程中, 两组双向辅助开关可分别实现零电压切换和零电流切换. 分析了电路的工作状态, 实验结果表明主开关和辅助开关都能实现软切换. 因此该单相全桥三电平逆变器可实现高效率运行.

**关键词:** 三电平; 逆变器; 零电压开关; 零电流开关; 双向开关

**中图分类号:** TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)12-3068-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.12.034

## A Single-Phase Full-Bridge Three-Level Energy-Saving Inverter

WANG Qiang<sup>1,2</sup>, YUE Yuan-shao<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:** When switching frequency increases, the switching losses in the single-phase full-bridge hard-switching inverter will also increase significantly so that the inverter is in low efficiency. In order to solve this problem, a single-phase full-bridge three-level energy-saving inverter is proposed. By resonance in the auxiliary commutation circuit, the voltage across capacitors in parallel with the main switches decreases to zero and the main switches could achieve zero-voltage switching. Furthermore, two groups of bidirectional auxiliary switches can achieve zero-voltage switching and zero-current switching respectively in the process of commutation. The working state of the circuit is analyzed. Experimental results show that the main switch and auxiliary switch can achieve soft switching. Therefore, the single-phase full-bridge three-level inverter can operate in high efficiency.

**Key words:** three-level; inverter; zero-voltage switching; zero-current switching; bidirectional switch

### 1 引言

在分布式发电系统并网等领域的应用需求下, 三电平逆变器已成为电力电子领域的重要研究方向. 在三电平逆变器中应用软开关技术, 对于进一步改善三电平逆变器的性能具有重要意义.

文献[1, 2]提出了具有谐振直流环节软开关拓扑结构的三电平逆变器, 但是因为直流母线之间设置了4个分压电容, 在分压不均时, 软开关的实现条件影响会受到影响. 文献[3~5]提出了具有谐振极

软开关拓扑结构的有源三电平逆变器, 但是如果该拓扑结构应用到单相全桥三电平逆变器中, 辅助开关数将多达8个, 控制相对繁琐. 文献[6]提出了具有谐振极软开关拓扑结构的无源三电平逆变器, 辅助电路无辅助开关器件, 控制相对简单, 但是直接串接在逆变器桥臂上的无源辅助器件的通态损耗会阻碍逆变器效率提高.

本文提出了一种新型单相全桥三电平谐振极软开关逆变器, 包含如下特点: (1) 辅助电路中没有起分压作用的大电容, 避免了中性点电位波动; (2) 辅助电路

收稿日期: 2017-06-13; 修回日期: 2017-09-25; 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)

结构简单,仅在两电平单相全桥硬开关逆变的基础上增加了两组双向辅助开关,1 个谐振电容,1 个谐振电感,和主开关并联的缓冲电容,而且辅助谐振电路与负载并联,未串接在逆变器主功率传输通道上,可以降低辅助电路通态损耗和提高逆变器的效率;(3)主开关能实现零电压软切换,两组双向辅助开关能分别实现零电压软切换和零电流软切换;(4)逆变器采用单极式控制,在逆变器输出电流波形的正半周期或负半周期内,其中 1 个桥臂的开关器件交替导通,另 1 个桥臂上的开关器件处于恒通或恒断状态.文中详细分析了电路在不同电平切换过程中的工作流程,最后在额定输出功率为 500W 的实验样机上验证了该单相全桥三电平逆变器的性能.

## 2 电路结构及工作过程

### 2.1 电路结构

主电路如图 1 所示.负载电感  $L$  和负载电阻  $R$  组成逆变器的阻感性负载,双向辅助开关  $S_{a1}$  和  $S_{a2}$ ,  $S_{a3}$  和  $S_{a4}$ ,及其反并联二极管  $D_{a1}$ 、 $D_{a2}$ 、 $D_{a3}$  和  $D_{a4}$ ,谐振电感  $L_r$  和谐振电容  $C_r$  组成的辅助电路与负载并联,主开关  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  和  $S_4$ ,及其反并联二极管  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  和  $D_4$  位于全桥逆变器的桥臂上,主开关分别并联缓冲电容  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  和  $C_4$ .利用辅助电路的谐振,当  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  和  $C_4$  的端电压周期性变化到零时,主开关能完成零电压软切换;当  $C_r$  的端电压周期性变化到零时,双向辅助开关  $S_{a1}$  和  $S_{a2}$  能完成零电压软切换;当流过与负载并联的辅助电路的电流等于零时,双向辅助开关  $S_{a3}$  和  $S_{a4}$  能完成零电流软切换.在分析电路时,作以下假设<sup>[7~11]</sup>:(1)各器件是理想器件;(2)阻感性负载中的电感值远大于辅助电路中的电感值,在一个开关周期内负载电流  $I_0$  是恒定的,把负载看作是恒流源.各部分电压和电流的正方向已在图 1 中标出.

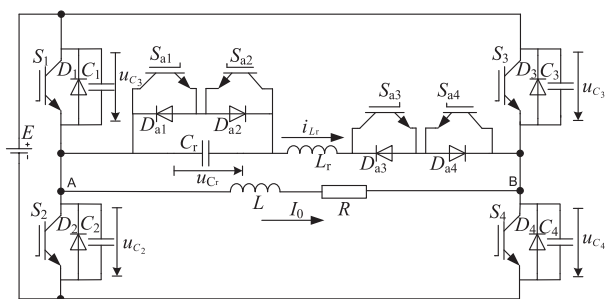


图1 单相全桥三电平谐振极软开关逆变器主电路

### 2.2 工作过程

在负载电流方向为正时,逆变器输出电压  $u_0$  在正的直流电源电压值  $+E$  和 0 之间进行切换;在负载电流方向为负时,逆变器输出电压  $u_0$  在负的直流电源电压

值  $-E$  和 0 之间进行切换;在负载电流方向变化的过渡过程中,逆变器输出电压  $u_0$  在  $+E$  和  $-E$  之间进行切换.接下来将以  $u_0$  在  $+E$  和 0 之间进行变化的过程为例,来分析电路的工作状态.

当  $u_0$  在  $+E$  和 0 之间变化时,有 10 个工作状态被包含在电路每个开关周期的工作过程中,电路特征波形如图 3 所示,图 4 为各工作状态等效电路图.

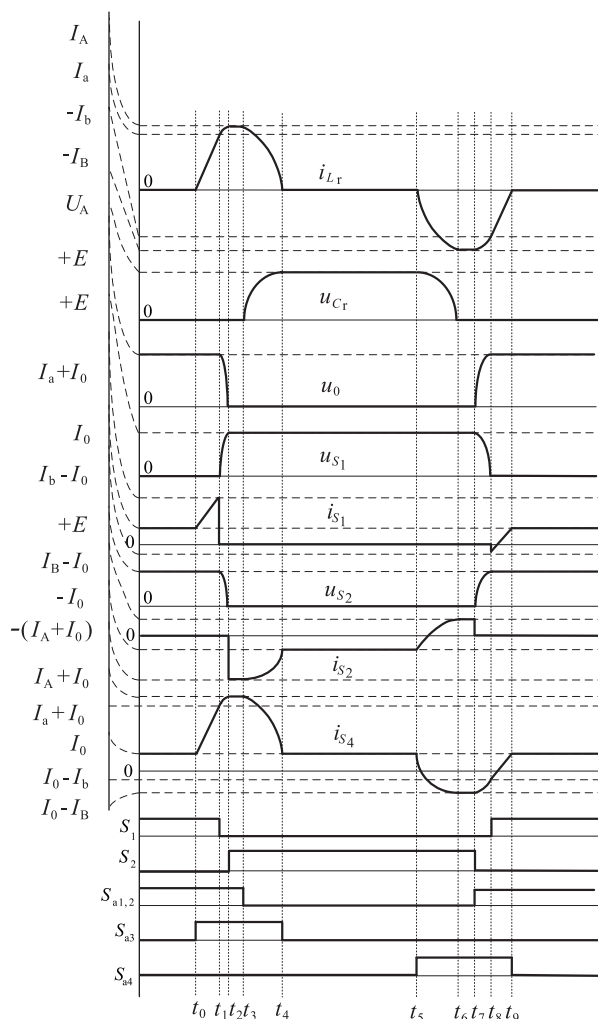
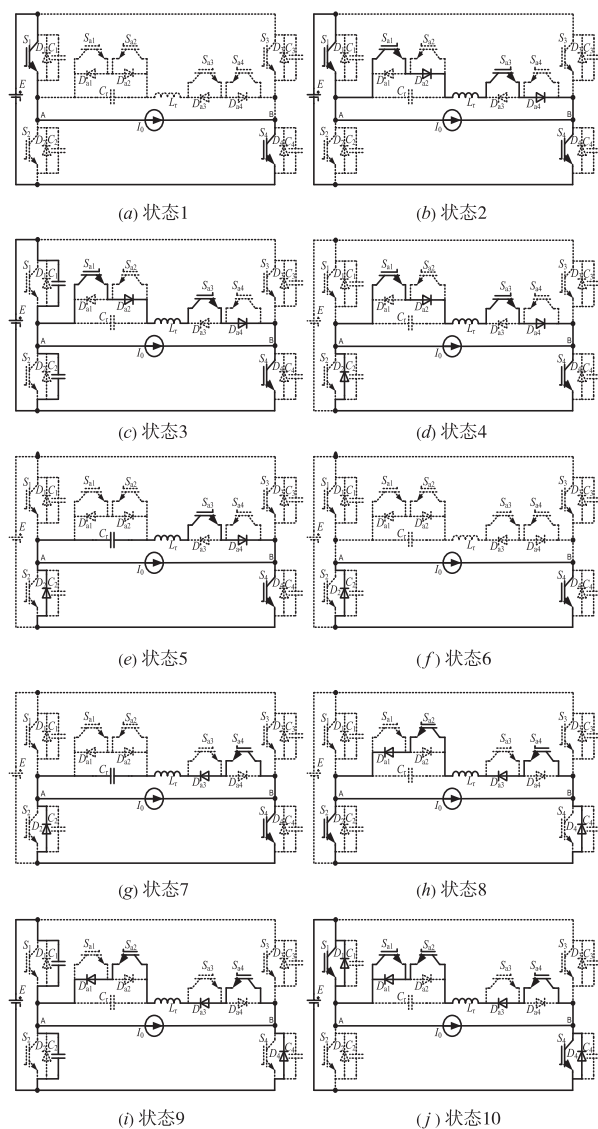


图2 谐振换流期间的理论工作波形( $u_0$ 在 $+E$ 和0之间变化)

(1)状态 1( $t \sim t_0$ ):电路工作在稳定状态,直流电源与主开关  $S_1$ 、 $S_4$  及负载构成稳定回路, $S_{a1}$  与  $S_{a2}$  处于开通状态,且初始条件为  $u_{Cr} = 0$ ,  $i_{Lr} = 0$ .

(2)状态 2( $t_0 \sim t_1$ ):在  $t_0$  时刻,开通  $S_{a3}$ ,由于  $L_r$  限制了  $S_{a3}$  发生开通动作时的电流上升速度,所以  $S_{a3}$  在开通时处于零电流软开通状态.在该状态中,电源电压  $E_{dc}$  施加在  $L_r$  两端, $i_{Lr}$  以恒定的速度增大,当  $i_{Lr}$  在  $t_1$  时刻增大到阈值  $I_a$  时,本状态结束.

(3)状态 3( $t_1 \sim t_2$ ):在  $t_1$  时刻,主开关  $S_1$  关断,因  $C_1$  限制了  $S_1$  关断时的电压变化速度,所以  $S_1$  在关断

图3 各个工作状态下的等效电路( $u_0$ 在 $+E$ 和 $0$ 之间变化)

时处于零电压软关断状态. 然后  $L_r$  与  $C_1$  和  $C_2$  进入谐振状态. 当  $u_{C_1}$  变化到  $E$  时,  $i_{L_r}$  增大至极值  $I_A$ , 本状态结束.

(4) 状态 4 ( $t_2 \sim t_3$ ): 在  $t_2$  时刻,  $u_{C_2}$  减小到零, 此时开通  $S_2$ , 可以实现零电压开通. 在本状态中, 负载电流  $I_0$  流过  $D_2$  和  $S_4$  来实现续流, 电感电流  $i_{L_r}$  流过  $D_2$ 、 $S_{a1}$ 、 $D_{a2}$ 、 $S_{a3}$ 、 $D_{a4}$  和  $S_4$  来实现续流, 电路处于稳态.

(5) 状态 5 ( $t_3 \sim t_4$ ): 在  $t_3$  时刻, 辅助开关  $S_{a1}$  和  $S_{a2}$  关断, 因  $C_r$  限制了  $S_{a1}$  和  $S_{a2}$  关断时的电压变化速度, 所以  $S_{a1}$  和  $S_{a2}$  在关断时处于零电压软关断状态. 从  $t_3$  时刻起,  $L_r$  与  $C_r$  开始谐振. 在  $t_4$  时刻, 当  $i_{L_r}$  减小至零,  $u_{C_r}$  增加到极值  $U_A$  时, 本状态结束.

(6) 状态 6 ( $t_4 \sim t_5$ ): 在  $t_4$  时刻,  $i_{L_r}$  减小为零, 此时关断辅助开关  $S_{a3}$ , 可实现零电流关断. 然后负载电流  $I_0$  通过  $S_4$  和  $D_2$  续流, 电路处于稳态.

(7) 状态 7 ( $t_5 \sim t_6$ ): 在  $t_5$  时刻, 开通  $S_{a4}$ , 由于  $L_r$  限制了  $S_{a4}$  发生开通动作时的电流上升速度, 所以  $S_{a4}$  在开通时处于零电流软开通状态. 从  $t_5$  时刻起,  $L_r$  与  $C_r$  谐振. 在  $t_6$  时刻, 在  $u_{C_r}$  变化到零,  $i_{L_r}$  反向变化到最大值  $I_B$  时, 本状态结束.

(8) 状态 8 ( $t_6 \sim t_7$ ): 在  $t_6$  时刻,  $u_{C_r}$  减小为零, 谐振结束, 此时开通辅助开关  $S_{a1}$  和  $S_{a2}$ , 可实现零电压开通. 然后电感电流  $i_{L_r}$  通过  $S_2$ 、 $D_4$ 、 $S_{a4}$ 、 $D_{a3}$ 、 $S_{a2}$  和  $D_{a1}$  实现续流, 电路处于稳态.

(9) 状态 9 ( $t_7 \sim t_8$ ): 在  $t_7$  时刻, 关断  $S_2$ , 因  $C_2$  限制了  $S_2$  关断时的电压变化速度, 所以  $S_2$  在关断时处于零电压软关断状态. 然后  $L_r$  与  $C_1$ 、 $C_2$  开始谐振. 当  $u_{C_1}$  减小到 0 时,  $i_{L_r}$  反向减小至  $I_b$ , 本状态结束.

(10) 状态 10 ( $t_8 \sim t_9$ ): 在  $t_8$  时刻,  $u_{C_1}$  减小至零, 此刻开通  $S_1$ , 可实现零电压开通. 从  $t_8$  时刻开始,  $L_r$  释放剩余电能,  $i_{L_r}$  处于恒速减小状态,  $i_{L_r}$  在  $t_9$  时刻变化为零时, 关断  $S_{a4}$ , 可实现零电流关断, 本状态结束. 然后电路返回状态 1, 进入下一个开关周期的工作.

### 3 实验结果

实验参数设定: 直流电源电压  $E = 200\text{V}$ , 输出功率  $P_0 = 500\text{W}$ , 逆变器输出电流峰值  $I_{0\max} = 7\text{A}$ , 输出电压有效值  $U_0 = 100\text{V}$ , 额定负载电阻  $R = 20\Omega$ , 缓冲电容  $C_1 = 10\text{nF}$ , 谐振电容  $C_r = 100\text{nF}$ , 谐振电感  $L_r = 25\mu\text{H}$ , 滤波电感  $L_f = 1\text{mH}$ , 滤波电容  $C_f = 2.2\mu\text{F}$ , 逆变器死区时间  $\Delta = 1\mu\text{s}$ , 辅助开关  $S_{a1}$ 、 $S_{a2}$ 、 $S_{a3}$ 、 $S_{a4}$  触发脉冲占空比分别为  $\rho_{Sa1} = 0.8$ ,  $\rho_{Sa2} = 0.8$ ,  $\rho_{Sa3} = 0.01$ ,  $\rho_{Sa4} = 0.01$ , 谐振电感电流阈值为  $I_a = 12\text{A}$ , 开关频率  $f_c = 20\text{kHz}$ , 输出频率  $f_0 = 50\text{Hz}$ .

图 4(a) 和图 4(b) 分别逆变器桥臂上的主开关器件  $S_1$  和  $S_2$  进行状态切换过程中承受的电压  $u_{S1}$  和  $u_{S2}$  及所流经的电流  $i_{S1}$  和  $i_{S2}$  的实验波形, 能看出  $S_1$  和  $S_2$  在开通过程中完成了零电压软开通动作, 在关断过程中完成了零电压软关断动作. 图 4(c) 和图 4(d) 分别为逆变器辅助开关  $S_{a1}$  和  $S_{a4}$  切换时端电压  $u_{Sa1}$  和  $u_{Sa4}$  及所流经的电流  $i_{Sa1}$  和  $i_{Sa4}$  的实验波形, 可看出  $S_{a1}$  和  $S_{a4}$  在开通过程中分别完成了零电压软开通动作和零电流软开通动作, 在关断过程中分别完成了零电压软关断动作和零电流软关断动作.

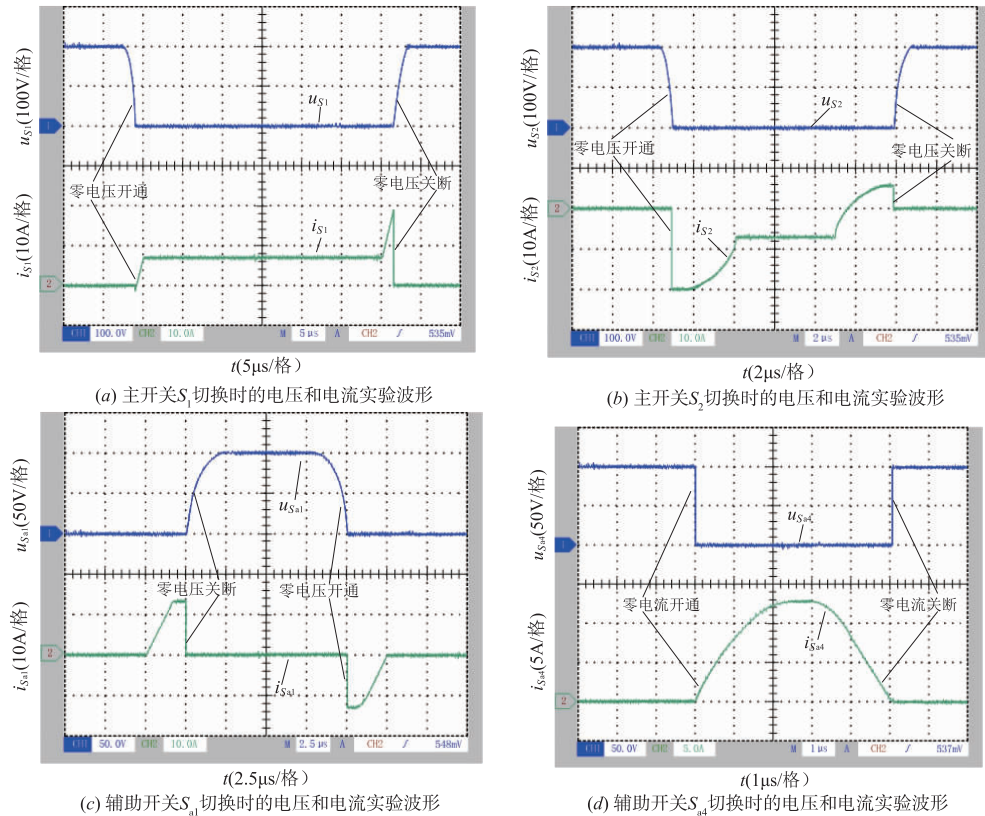


图4 实验波形

## 4 结论

本文设计了一种单相全桥三电平谐振极软开关逆变器,辅助电路中没有器件串接在主功率传输通道,可以降低辅助电路通态损耗和提高逆变器效率,利用两组双向辅助开关控制辅助电路工作,能使逆变器处于死区状态时,并联在主开关上的缓冲电容的电压周期性减小到零,从而实现主开关的零电压开通,而且双向辅助开关的开关频率和触发脉冲占空比都可以取为固定值,控制简单。经实验验证得到的结论如下:(1)逆变器主开关能实现零电压切换;(2)与谐振电感 $L_r$ 串联的辅助开关可实现零电流切换;与谐振电容 $C_r$ 并联的辅助开关可实现零电压切换。对于研发具有高开关频率和高效率的单相全桥逆变器,本文研究工作具有重要参考价值。

### 参考文献

- [1] Chang Jie, Hu Jun. Modular design of soft-switching circuits for two-level and three-level inverter[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2006, 21(1): 131–139.
- [2] 王强, 刘岩松, 陈祥雪, 等. 具有对称辅助电路的谐振直流环节三电平软开关逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4584–4593.
- [3] 李锦, 刘进军. 有源中点钳位三电平零电流转换软开关变流器[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 195–201, 233. Li Jin, Liu Jinjun. Three-level active neutral-point-clamped zero-current-transition converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 195–201, 233. (in Chinese)
- [4] Li Jin, Liu Jinjun, Boroyevich D, et al. Three-level active neutral-point-clamped zero-current-transition converter for sustainable energy systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3680–3693.
- [5] 姚修远, 吴学智, 杜宇鹏, 等. T型中点钳位三电平逆变器的零电流转换软开关技术[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 179–188. Yao Xiuyuan, Wu Xuezhi, Du Yupeng, et al. The zero-current-transition soft-switching technique for t-type neutral-point-clamped inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(23): 179–188. (in Chinese)
- [6] 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

Wang Qiang, Liu Yansong, Chen Xiangxue, et al. Resonant DC link three-level soft-switching inverter with symmetrical auxiliary circuits[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4584–4593. (in Chinese)



(5):890-899.

- [7] 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)

- [8] 王强,单瑞香,王天施,等. 单相全桥谐振直流环节软开关逆变器[J]. 电机与控制学报,2017,21(3):38-47.

Wang Qiang, Shan Ruixiang, Wang Tianshi, et al. Single-phase full-bridge resonant DC-link soft-switching inverter[J]. Electric Machines and Control,2017,21(3):38-47.

- [9] 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)

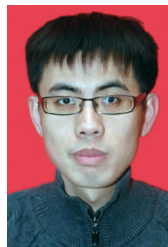
- [10] 王强,唐朝垠,王天施,等. 用于无刷直流电机驱动的谐振极软开关逆变器[J]. 电机与控制学报,2017,21(6):59-65.

Wang Qiang, Tang Chaoyin, Wang Tianshi, et al. A resonant pole soft-switching inverter for brushless DC motor drives[J]. Electric Machines and Control,2017,21(6):59-65. (in Chinese)

- [11] 王强,刘岩松,陈祥雪,等. 具有单辅助开关的谐振直流环节逆变器[J]. 电子学报,2014,42(11):2321-2324.

Wang Qiang, Liu Yansong, Chen Xiangxue, et al. Resonant DC link inverter with a single auxiliary switch[J]. Acta Electronica Sinica,2014,42(11):2321-2324. (in Chinese)

## 作者简介



王 强(通讯作者) 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



岳远韶 男,1993 年 3 月出生于江苏省徐州市,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:1216068881@qq.com



王天施 男,1970 年 1 月出生于辽宁省法库县,博士,现为辽宁石油化工大学信息与控制工程学院副教授,主要研究方向为软开关变换器的电路拓扑及控制.

E-mail:wts55@126.com



刘晓琴 女,1975 年 2 月出生于辽宁省辽阳县,硕士,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:qinbuluoge@163.com