

中小功率三相高频节能型谐振极逆变器

王 强^{1,2}, 徐有万^{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: 作为中小功率发电系统重要环节的三相逆变器的开关频率增大时, 开关损耗也显著增大, 不利于节能。为实现中小功率三相逆变器的高频化和节能化, 提出了一种三相零电压开关谐振极逆变器拓扑结构。当桥臂上的辅助谐振电路处于工作状态时, 开关器件并联的电容的电压能周期性变化到零, 使开关器件完成零电压软切换, 这有利于高频金属氧化物半导体场效应晶体管(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET)作为逆变器的开关器件。分析了电路的工作流程, 实验结果表明开关器件处于零电压软切换。因此, 该拓扑结构对于研发高性能的中小功率三相逆变器具有参考价值。

关键词: 逆变器; 桥臂; 辅助谐振电路; 零电压开关; 开关损耗

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)07-1596-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.07.027

Medium and Small Power Three-Phase High-Frequency Energy-Saving Resonant Pole Inverter

WANG Qiang^{1,2}, XU You-wan^{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: When the switching frequency of the three-phase inverter used as an important link in the medium and small power generation system increases, switching loss will also increase significantly, which is not favourable to save energy. In order to realize high frequency and energy-saving of medium and small power three-phase inverter, a topology of three-phase zero-voltage switching resonant pole inverter is proposed. When the auxiliary resonant circuit on the bridge arm is in a working state, the voltage across the capacitors parallel with the main switches and the auxiliary switches can periodically change to zero, so that the switching devices can achieve zero-voltage soft-switching, which is beneficial to the metal oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET) used as the switching device of the inverter. The working flow of the circuit is analyzed. The experimental results show that the switching devices achieve zero-voltage soft-switching. Therefore, this topology structure has certain reference value for the research and development of the small and medium power three-phase inverter with high-performance.

Key words: inverter; bridge arm; auxiliary resonant circuit; zero-voltage switching; switching loss

1 引言

在电力电子逆变装置中采用软开关技术不仅显著提高了逆变器的效率、功率密度和稳定性, 而且大大减小了电力电子变换器大功率化和高频化所产生的电磁干扰和噪声污染等不良影响。软开关技术一经提出就受到电力电子领域相关研究人员的重视, 成为该领域

的热点研究课题^[1]。当前软开关逆变器的研究主要集中于谐振直流环节逆变器和谐振极逆变器。谐振极软开关逆变器的辅助谐振电路位于逆变器的桥臂上, 直流环节电压在辅助谐振电路工作时不受影响。因此, 研究人员对谐振极逆变器的研究越来越重视。

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在高频化中小功率三

收稿日期: 2018-12-09; 修回日期: 2019-01-23; 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)

相逆变器中应用 MOSFET 具有重要意义,但是文献[2~5]提出的三相谐振极逆变器的主开关和辅助开关不能都实现零电压软开通。

为使中小功率三相逆变器向高频化和节能化发展,本文提出了一种三相零电压开关谐振极逆变器的拓扑结构,电路中的主开关和辅助开关都能实现零电压软开通和零电压软关断,因此,电路中开关器件可以统一使用高频 MOSFET. 此外,该拓扑结构还具有以下特点:(1)辅助谐振电路结构简单,每相辅助电路只有 2 个辅助开关,1 个谐振电感和 4 个谐振电容;(2)在谐振电流阈值确定以后,辅助开关触发脉冲的占空比可以设计为固定值,逆变器主开关仍然可以采用传统的脉宽调制方法,在每个开关周期内,仅需使主开关触发脉冲延迟固定时间发生变化,辅助开关在主开关的原关断时刻开通. 本文分析了电路的工作流程,在一台 3kW 的三相实验样机上验证了该三相零电压开关谐振极逆变器的有效性.

2 电路工作过程分析

2.1 电路结构

图 1 给出了逆变器主电路,每相桥臂分别设置了辅助电路. 4 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谐振电路,且各相的辅助谐振电路相互独立.

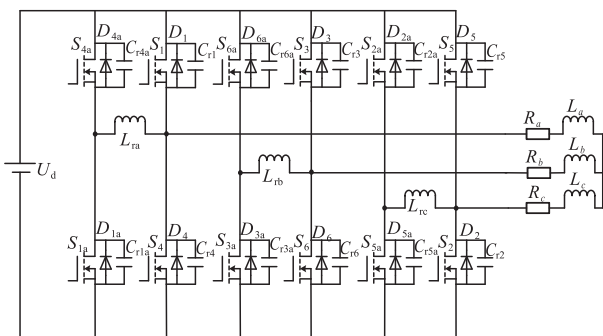


图1 三相零电压开关谐振极逆变器主电路

2.2 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彼此独立可控,所以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. 11 个流程被包含在电路每个开关周期的工作过程,图 2 给出了电路谐振换流期间的理论特征工作波形,图 3 为各流程等效电路图.

(1) 流程 1 ($t \sim t_0$): 该流程中, S_1 触发脉冲为低电平, S_1 处于关断状态; S_4 触发脉冲为高电平, S_4 处于开通

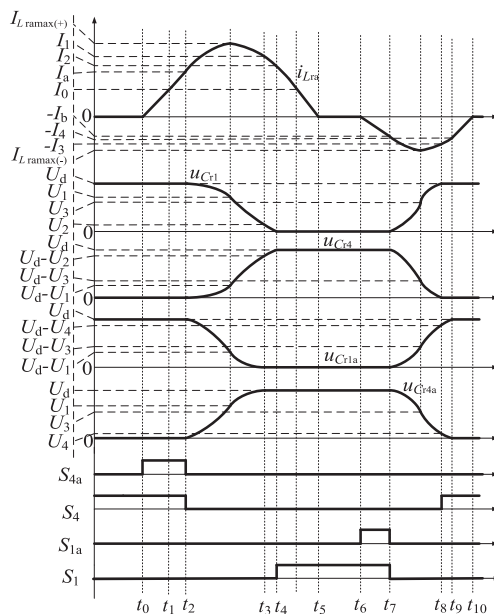


图2 谐振换流期间的理论工作波形

状态,但是无电流流过 S_4 . 如图 3(a) 所示,负载电流向正方向流动,负载电流只能流过 D_4 来续流,当负载电流向负方向流动时,负载电流才能流过 S_4 . 该流程中,电路处于稳态.

(2) 流程 2 ($t_0 \sim t_1$): 在 t_0 时刻,开通 S_{4a} , 电流流过 S_{4a} 之前, u_{Cr4a} 等于零,所以实现了 S_{4a} 的零电压软开通, S_{4a} 开通之后, L_{ra} 被正向充电, i_{Lra} 开始处于正向线性增大的状态,流过 D_4 的电流从 I_0 开始线性减小. 在 t_1 时刻, i_{Lra} 正向线性增大到 I_0 , D_4 关断,流程 2 结束.

(3) 流程 3 ($t_1 \sim t_2$): 在 t_1 时刻,电流开始流过 S_4 , L_{ra} 继续处于正向充电状态, i_{Lra} 从 I_0 开始继续正向线性增加,在 t_2 时刻, i_{Lra} 正向线性增加到谐振电感的电流阈值 I_1 时,流程 3 结束.

(4) 流程 4 ($t_2 \sim t_3$): 在 t_2 时刻,关断 S_4 和 S_{4a} , 因为 S_4 和 S_{4a} 分别并联了 C_{r4} 和 C_{r4a} , C_{r4} 和 C_{r4a} 分别限制了 S_4 和 S_{4a} 发生关断动作时的端电压上升速度,所以 S_4 和 S_{4a} 在关断时处于零电压软关断状态. 在 S_4 和 S_{4a} 完成切换动作之后,电流将同时流过 C_{r4} , C_{r1} , C_{r4a} 和 C_{r1a} , L_{ra} 和 C_{r4} , C_{r1} , C_{r4a} , C_{r1a} 进入谐振状态, C_{r1} 和 C_{r1a} 开始放电, C_{r4} 、 C_{r4a} 和 L_{ra} 被正向充电, L_{ra} 继续正向增大,当 u_{Cr1} 和 u_{Cr4a} 的端电压值同时变成 U_1 时, i_{Lra} 达到正向最大值 $I_{Lra(max+)}$. 接下来 L_{ra} 进入到正向放电状态, C_{r1} 和 C_{r1a} 继续放电, C_{r4} 和 C_{r4a} 继续被充电, i_{Lra} 开始从正向最大值减小,在 t_3 时刻, u_{Cr1} 减小到 U_2 , u_{Cr4} 增加到 $U_d - U_2$, u_{Cr1a} 减小到零, u_{Cr4a} 增加到 U_d , i_{Lra} 减小到 I_1 , 流程 4 结束.

(5) 流程 5 ($t_3 \sim t_4$): 在 t_3 时刻, D_{1a} 导通, L_{ra} 和 C_{r4} , C_{r1} , C_{r4a} , C_{r1a} 谐振结束, u_{Cr4a} 增加到 U_d , u_{Cr1a} 减小到零,同时 L_{ra} 和 C_{r4} , C_{r1} 进入谐振状态, C_{r1} 仍然处于释放电能的

过程, C_{r4} 仍然处于吸收电能的过程, L_{ra} 继续处于正向释放电能的过程, i_{Lra} 以 I_1 为起点仍然处于正向减小的状

态, 在 t_4 时刻, u_{Crd} 增加到 U_d , u_{Cr1} 减小到零, i_{Lra} 减小到 I_2 , 流程 5 结束.

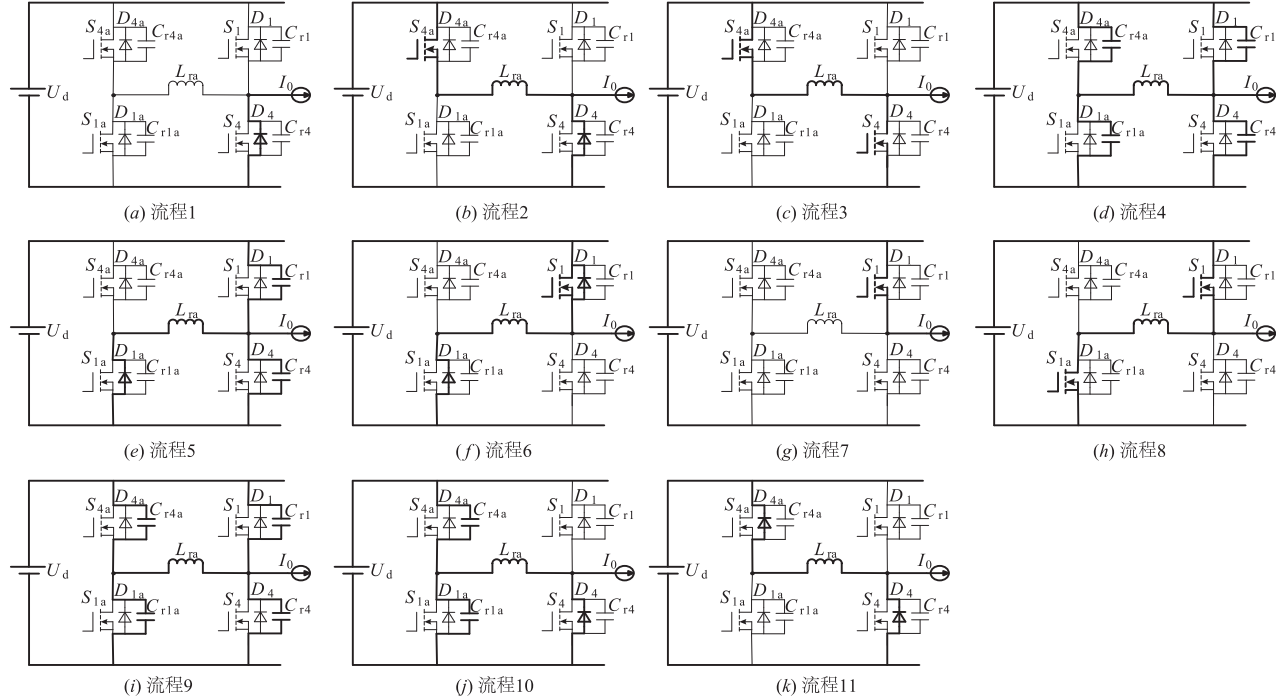


图3 各工作流程的等效电路图

(6) 流程 6 ($t_4 \sim t_5$): 在 t_4 时刻, L_{ra} 和 C_{r4} , C_{r1} 谐振结束, D_1 导通, 开通 S_1 , 为防止 L_{ra} , C_{r4} 和 C_{r1} 再次谐振, S_1 的开通必须在 i_{Lra} 减小到 I_0 之前完成, 因为电流流过 S_1 之前, u_{S1} 等于零, 所以实现了 S_1 的零电压软开通, L_{ra} 仍然处于正向释放出电能的过程, i_{Lra} 以 I_2 为起点开始处于正向线性减小的状态, 当 i_{Lra} 减小到 I_0 时, D_1 自然关断, 电流开始流过 S_1 , L_{ra} 仍然处于正向放电状态, i_{Lra} 以 I_0 为起点仍然处于正向线性减小的状态, 在 t_5 时刻, i_{Lra} 减小到零, u_{Crd} 和 u_{Cr4a} 为 U_d , u_{Cr1} 和 u_{Cr1a} 为零, 流程 6 结束.

(7) 流程 7 ($t_5 \sim t_6$): 在 t_5 时刻, 负载电流通过 S_1 实现续流, 此时 u_{Crd} 和 u_{Cr4a} 仍然保持为 U_d , u_{Cr1} 和 u_{Cr1a} 仍然保持为零, i_{Lra} 等于零, 电路处于稳态.

(8) 流程 8 ($t_6 \sim t_7$): 在 t_6 时刻, 开通 S_{1a} , 因为电流流过 S_{1a} 之前, u_{Cr1a} 等于零, 所以 S_{1a} 实现了零电压软开通, S_{1a} 开通之后, L_{ra} 开始处于反向吸收电能的过程, i_{Lra} 开始反向线性增加, 在 t_6 时刻, i_{Lra} 反向增大到谐振电感的电流阈值 $-I_b$, 流程 8 结束.

(9) 流程 9 ($t_7 \sim t_8$): 在 t_7 时刻, 关断 S_1 和 S_{1a} , 因为 S_1 和 S_{1a} 分别并联了 C_{r1} 和 C_{r1a} , C_{r1} 和 C_{r1a} 分别限制了 S_1 和 S_{1a} 发生关断动作时的端电压上升速度, 所以 S_1 和 S_{1a} 在关断时处于零电压软关断状态. 在 S_1 和 S_{1a} 完成零电压软关断动作之后, 电流将同时流过 C_{r4} , C_{r1} , C_{r4a} 和 C_{r1a} , L_{ra} 和 C_{r4} , C_{r1} , C_{r4a} , C_{r1a} 进入谐振状态, C_{r1} 和 C_{r1a} 开始

处于吸收电能的状态, C_{r4} , C_{r4a} 开始处于释放电能的状态, L_{ra} 继续处于反向吸收电能的状态, L_{ra} 继续反向增大, 当 u_{Cr1} 和 u_{Cr4a} 同时达到 U_3 , i_{Lra} 达到反向最大值 $-I_{Lramax}(-)$. 接下来 L_{ra} 进入到反向放电状态, C_{r1} 和 C_{r1a} 继续处于吸收电能的状态, C_{r4} 和 C_{r4a} 继续处于释放电能的状态, i_{Lra} 开始从反向最大值减小, 在 t_8 时刻, u_{Crd} 减小到 U_4 , u_{Cr1a} 增加到 $U_d - U_4$, u_{Crd} 减小到零, u_{Cr1} 增加到 U_d , i_{Lra} 反向减小到 $-I_3$, 流程 9 结束.

(10) 流程 10 ($t_8 \sim t_9$): 在 t_8 时刻, D_4 导通, 开通 S_4 , 电流流过与 S_4 反并联的二极管 D_4 , u_{Crd} 等于零, 所以 S_4 实现了零电压软开通. L_{ra} 和 C_{r4} , C_{r1} , C_{r4a} , C_{r1a} 谐振结束, u_{Cr1} 增加到 U_d , u_{Crd} 减小到零, 同时 L_{ra} 和 C_{r4a} , C_{r1a} 进入谐振状态, 接着 C_{r4a} 仍然处于释放出电能的过程, C_{r1a} 仍然处于吸收电能的过程, L_{ra} 继续处于反向释放电能的过程, i_{Lra} 以 $-I_3$ 为起点仍然处于反向减小的状态, 在 t_9 时刻, u_{Cr1a} 增加到 U_d , u_{Crd} 减小到零, i_{Lra} 反向减小到 $-I_4$, 流程 10 结束.

(11) 流程 11 ($t_9 \sim t_{10}$): 在 t_9 时刻, L_{ra} 和 C_{r4a} , C_{r1a} 谐振结束, D_{4a} 导通, L_{ra} 仍然处于反向释放电能的过程, i_{Lra} 以 $-I_4$ 为起点开始处于反向线性减小的状态, 在 t_{10} 时刻, i_{Lra} 减小到零, D_{4a} 自然关断, 流程 11 结束.

3 实验验证

样机参数如下: 额定输出功率 $P_0 = 3\text{kW}$, 三相负载

电阻 $R_a = R_b = R_c = 6\Omega$, 三相负载电感 $L_a = L_b = L_c = 0.8\text{mH}$, 直流电源电压 $U_d = 220\text{V}$, 辅助开关 S_{1a}, S_{3a} 和 S_{5a} 的触发脉冲占空比为 $\rho_{S_{1a}} = \rho_{S_{3a}} = \rho_{S_{5a}} = 0.022$, 辅助开关 S_{2a}, S_{6a} 和 S_{4a} 的触发脉冲占空比为 $\rho_{S_{2a}} = \rho_{S_{6a}} = \rho_{S_{4a}} = 0.065$, 最大负载电流 $I_{0\text{max}} = 18\text{A}$, 开关频率 $f_c = 20\text{kHz}$, 输出频率 $f_0 = 50\text{Hz}$, 三相谐振电感 $L_{ra} = L_{rb} = L_{rc} = 30\mu\text{H}$, 三相谐振电容 $C_{ra} = C_{rb} = C_{rc} = 0.018\mu\text{F}$, 死区时间 $\Delta = 0.9\mu\text{s}$.

图 4(a) 和图 4(b) 分别给出了 S_{4a} 和 S_{1a} 进行切换动作时的端电压 $u_{S_{4a}}, u_{S_{1a}}$ 和流过的电流 $i_{S_{4a}}, i_{S_{1a}}$ 的实验波形, 可以看出 S_{4a} 和 S_{1a} 开通时, $i_{S_{4a}}$ 和 $i_{S_{1a}}$ 从零增大之前,

$u_{S_{4a}}$ 和 $u_{S_{1a}}$ 已经变化到零, 实现了 S_{4a} 和 S_{1a} 的零电压软开通; 还可以看出在 S_{4a} 和 S_{1a} 关断时, $u_{S_{1a}}$ 和 $u_{S_{4a}}$ 均以较低的变化率正向增大, 实现了 S_{4a} 和 S_{1a} 的零电压软关断. 图 4(c) 和图 4(d) 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, 从实验波形看出 S_1 关断时, u_{S_1} 以较低的变化率正向增大, 轻载和满载时都实现了 S_1 的零电压软关断; 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.

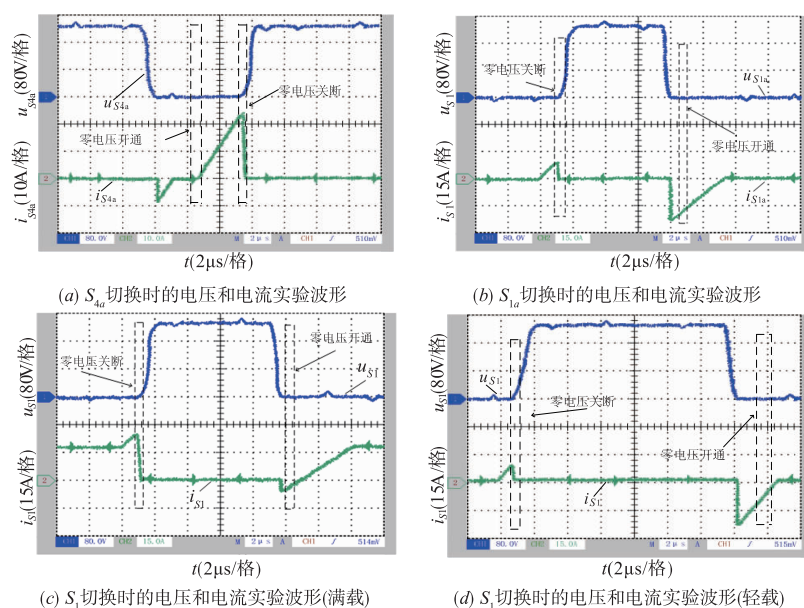


图4 实验波形

4 结论

与其他文献中的谐振极逆变器拓扑结构相比较, 本文设计的拓扑结构的突出优点和创新之处是主开关和辅助开关都能实现零电压软开通和零电压软关断, 可以统一使用高频 MOSFET 作为逆变器的开关器件. 经实验验证得出结论: 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压软关断动作, 而且辅助开关也可以完成零电压软开通动作和零电压软关断动作. 本文的研究成果对于研发高频化和节能化的中小功率三相谐振极软开关逆变器具有借鉴意义.

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 Tian-shi, 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] 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.
- [3] Yu Wensong, Lai J S, Park S Y. An improved zero-voltage switching inverter using two coupled magnetics in one resonant pole [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(4): 952-961.
- [4] 褚恩辉, 黄亮, 张化光, 等. 一种双辅助谐振极型三相软开关逆变器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3912-3920.
Chu Enhui, Huang Liang, Zhang Huaguang, et al. Study on a double auxiliary resonant commutated pole three-phase soft-switching inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3912-3920. (in Chinese)

[5] Zhang Huaguang, Wang Qiang, Chu Enhui, et al. Analysis and implementation of a passive lossless soft-switching

snubber for PWM inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(2): 411-426.

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



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