

变压器辅助换流的三相节能型谐振极逆变器

王 强¹, 徐有万², 王天施¹, 刘晓琴¹

(1. 辽宁石油化工大学信息与控制工程学院, 辽宁抚顺 113001; 2. 天地(常州)自动化股份有限公司, 江苏常州 213000)

摘 要: 在谐振极软开关逆变器辅助电路的换流过程中, 为避免剩磁通的累积导致变压器铁心饱和, 提出了一种变压器辅助换流的三相节能型谐振极逆变器的拓扑结构, 在二极管反向阻断的作用下, 变压器的磁化电流无法形成稳态环流, 从而使变压器中的能量全部向负载转移, 磁化电流最终变化到零, 实现了变压器的去磁复位. 此外, 逆变器的主开关和辅助开关可以分别完成零电压软切换和零电流软切换. 分析了电路的换流过程. 实验结果表明逆变器的开关器件完成了软切换, 变压器磁化电流能减小到零. 该拓扑结构对于研发高性能谐振极逆变器具有一定的参考价值.

关键词: 逆变器; 软开关; 变压器; 磁化电流; 谐振

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2020)03-0621-04

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.03.027

Three-Phase Energy-Saving Resonant Pole Inverter with Transformer-Assisted Commutation

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. Tiandi (Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu 213000, China)

Abstract: In the commutation process of auxiliary circuit in the resonant pole soft-switching inverter, the accumulation of remanence can lead to saturation of transformer core. To avoid this case, the article proposes a novel topology of three-phase energy-saving resonant pole inverter with transformer-assisted commutation. Under the effect of diode reverse blocking, the magnetizing current of the transformer is unable to form a steady state circulation so that all the energy in the transformer is transferred to the load. The magnetizing current changes to zero, which realizes demagnetizing and resetting function of transformer finally. In addition, the main switch and auxiliary switch of the inverter can achieve zero-voltage soft-switching and zero-current soft-switching respectively. The article analyzes the commutation process. The experimental results show that the switching devices of the inverter have achieved soft switching and the magnetization current of the transformer can reduce to zero. The topology has a certain reference value for the development of the high-performance resonant pole inverter.

Key words: soft-switching; transformer; magnetizing current; resonance

1 引言

当前软开关逆变器的研究集中于谐振极逆变器和谐振直流环节逆变器, 这是按辅助谐振单元的位置来划分的. 谐振直流环节逆变器的软开关实现依靠直流环节电压周期性形成的零状态^[1], 这会影响逆变器的直流电压利用率. 相比于谐振直流环节逆变器, 辅助电路的工作不影响谐振极逆变器的直流电压利用率, 因此, 谐振极逆变器近些年受到了越来越多的关注. 研究人员已提出了多种谐振极逆变器拓扑结构, 但是这些拓扑结构仍然存在缺陷.

文献[2~4]提出的拓扑结构都设置了变压器来辅助换流, 在文献[2,3]的拓扑结构中, 每个开关周期内的变压器磁化电流都不能衰减为零, 磁化电流在逆变器稳态运行时会形成稳态环流存在于电路中, 造成变压器剩磁通不断累积, 会导致变压器铁心饱和; 在文献[4]的拓扑结构中, 变压器的磁化电流无法形成稳态环流, 通过将直流电源电压反向施加在变压器绕组上使每个开关周期内的磁化电流都衰减为零, 变压器实现了去磁复位, 但是其辅助开关在关断时是硬关断, 存在关断损耗, 而且每相辅助电路设置两个变压器, 不利于降低硬件成本和装置体积.

收稿日期: 2018-06-04; 修回日期: 2019-08-13; 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)

本文提出了一种变压器辅助换流的节能型谐振极逆变器拓扑结构,相比于其它含有变压器的同类型逆变器,其具有的优势是辅助电路不存在使变压器磁化电流形成稳态环流的回路,磁化电流在每个开关周期内都可以自然衰减为零,变压器自然实现了去磁复位,而且开关器件都能可靠完成软切换.文中将分析电路的换流过程,最终在3kW的三相实验样机上来验证了该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

图1为逆变器主电路,每相桥臂分别设置了辅助电路,且各相辅助电路相互独立.图2为逆变器的单相等效电路, U_d 为直流电源, S_{a1} 和 S_{a2} 为辅助开关, $D_{S_{a1}}$ 、 $D_{S_{a2}}$ 、 D_{C1} 和 D_{C2} 为辅助二极管,高频变压器用 T_1 表示,变压器的原边绕组和副边绕组的匝数分别用 N_1 和 N_2 表示(匝数比为 $n = N_2 : N_1 > 1$).变压器的等效磁化电感用 L_{m1} 来表示,变压器的漏感等效成的谐振电感用 L_{r1} 来表示,其中谐振电感值远小于磁化电感值.流过 L_{r1} 、 L_{m1} 的电流分别用 $i_{L_{r1}}$ 和 $i_{L_{m1}}$ 来表示,缓冲电容 C_1 和 C_2 的端电压分别用 u_{C1} 和 u_{C2} 来表示. $D_{S_{a1}}$ 使 L_{r1} 、 L_{m1} 、 S_1 和 D_{a1} 组成的闭合回路内无法形成稳态环流, $D_{S_{a2}}$ 使 L_{r1} 、 L_{m1} 、 D_{a2} 和负载组成的闭合回路无法形成稳态环流,从而使变压器实现去磁复位.

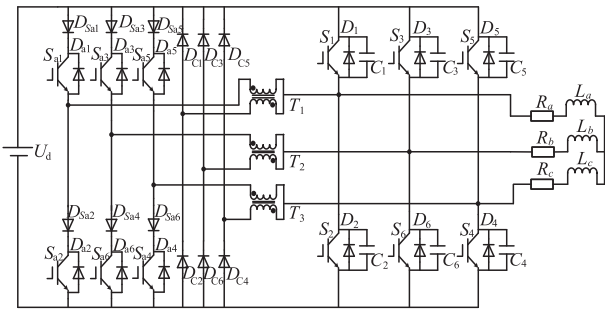


图1 变压器辅助换流的三相节能型谐振极逆变器主电路

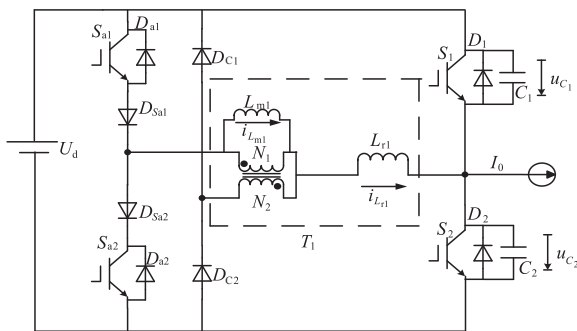


图2 单相等效电路

2.2 电路的工作流程

10个流程被包含在电路每个开关周期的工作过

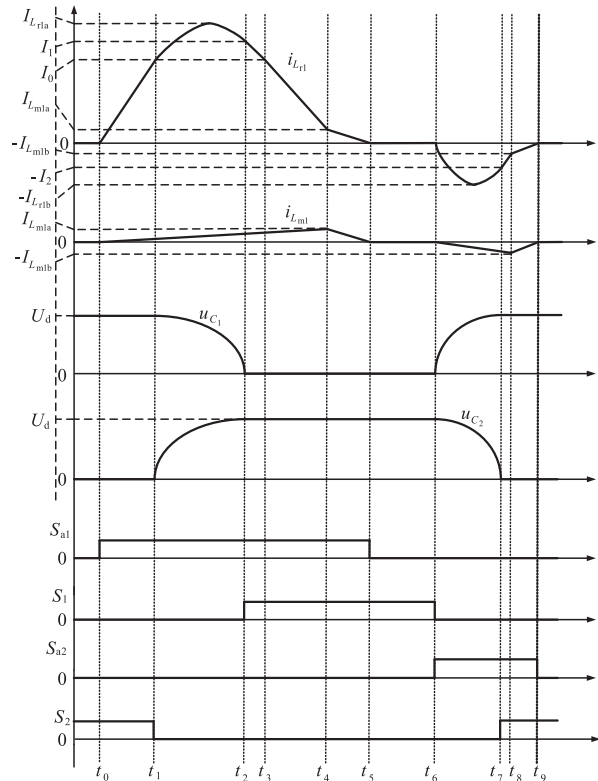


图3 谐振换流期间的理论工作波形

程,图3为电路谐振换流期间的理论特征工作波形,图4为各流程等效电路图.

(1) 流程1($t \sim t_0$): S_2 处于开通状态,负载电流通过 D_2 实现续流,没有电流流过开关器件, S_1 和 S_{a1} 、 S_{a2} 都处于截至状态.此时 u_{C1} 与 U_d 相等, u_{C2} 等于零, $i_{L_{r1}}$ 等于零, $i_{L_{m1}}$ 等于零,电路处于稳态.

(2) 流程2($t_0 \sim t_1$):在 t_0 时刻,开通 S_{a1} , L_{r1} 和 L_{m1} 阻碍了 S_{a1} 发生开通动作时的电流快速变化,因此 S_{a1} 在开通时处于零电流软开通状态. S_{a1} 开通之后, D_{C2} 导通, L_{r1} 两端电压为 $nU_d/(n+1)$, L_{m1} 两端电压为 $U_d/(n+1)$, L_{r1} 和 L_{m1} 都被正向充电, $i_{L_{r1}}$ 和 $i_{L_{m1}}$ 都处于正向线性增大的状态,其中, $i_{L_{r1}}$ 的增大速率与流过 D_2 的电流的减小速率相同,在 $i_{L_{r1}}$ 变化到与 I_0 相等的 t_1 时刻, D_2 截至,流程2结束.

(3) 流程3($t_1 \sim t_2$):在 t_1 时刻,关断 S_2 ,因为 S_2 并联了 C_2 , C_2 阻碍了 S_2 发生关断动作时的端电压快速变化,所以 S_2 在关断时处于零电压软关断状态.在 S_2 完成切换动作之后,电流同时流过 C_1 和 C_2 , L_{r1} 和 C_1 、 C_2 进入谐振状态, C_1 开始正向放电, C_2 被正向充电, L_{r1} 继续被正向充电,当 u_{C1} 减小到 $U_d/(n+1)$ 时, $i_{L_{r1}}$ 达到正向最大值 $I_{L_{ra1}}$,接下来 L_{r1} 进入到正向放电状态, C_1 继续处于正向放电状态, C_2 继续处于正向充电状态, $i_{L_{r1}}$ 开始从正向最大值减小,在 t_2 时刻, u_{C1} 减小到零, u_{C2} 增加到 U_d , $i_{L_{r1}}$ 减小到 I_1 ,流程3结束.

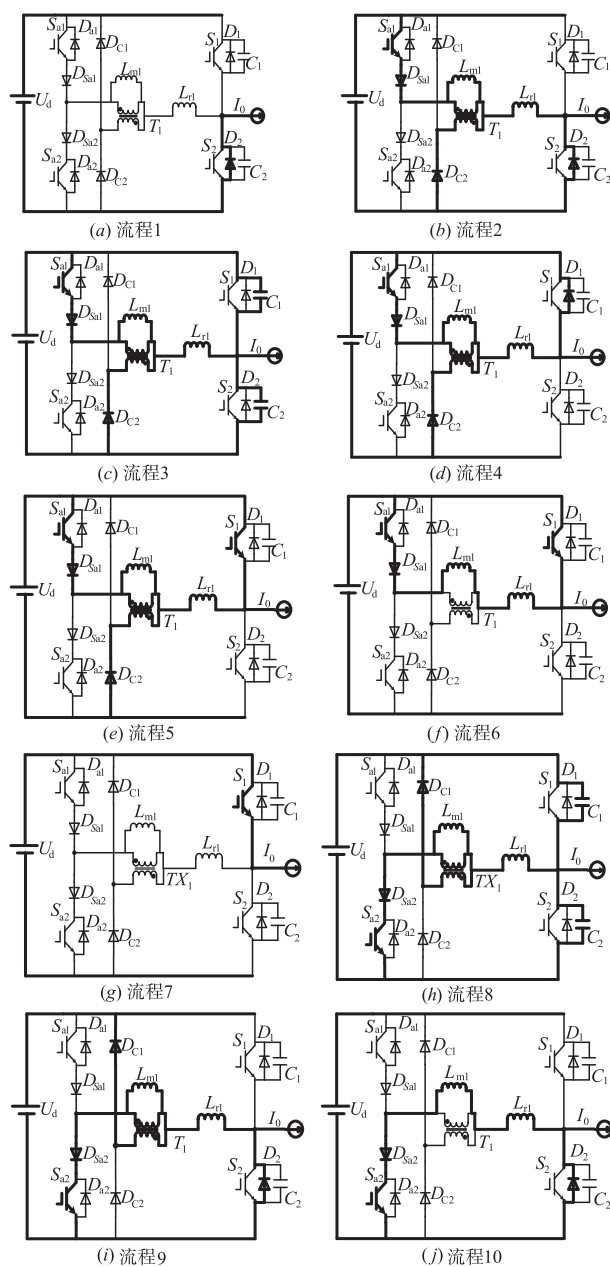


图4 各工作流程的等效电路图

(4) 流程 4 ($t_2 \sim t_3$): 在 t_2 时刻, L_{r1} 和 C_2, C_1 谐振结束, D_1 导通, 开通 S_1 , 为防止 L_{r1}, C_1 和 C_2 再次谐振, S_1 的开通必须在 $i_{L_{r1}}$ 减小到 I_0 之前完成, 因为电流流过 S_1 之前, u_{S_1} 等于零, 所以实现了 S_1 的零电压软开通, L_{r1} 仍然处于正向释出电能的过程, $i_{L_{r1}}$ 以 I_1 为起点开始处于正向线性减小的状态, 在 t_3 时刻, $i_{L_{r1}}$ 减小到 I_0 , D_1 自然关断, 流程 4 结束。

(5) 流程 5 ($t_3 \sim t_4$): 在 t_3 时刻, 流过 D_1 的电流减小为零, 电流开始流过 S_1 , L_{r1} 两端的电压为 $U_d/(n+1)$, L_{m1} 两端电压仍保持为 $U_d/(n+1)$, L_{r1} 处于正向放电状态, $i_{L_{r1}}$ 以 I_0 为起点仍然处于正向线性减小的状态, L_{m1} 被

正向充电, $i_{L_{m1}}$ 处于正向线性增大的状态, $i_{L_{r1}}$ 和 $i_{L_{m1}}$ 同时在 t_4 时刻变化到 $I_{L_{m1a}}$, D_{C_2} 自然关断, 流程 5 结束。

(6) 流程 6 ($t_4 \sim t_5$): 在 t_4 时刻, D_{C_2} 关断, 磁化电流流过 $L_{r1}, L_{m1}, S_{a1}, D_{S_{a1}}$, 考虑到二极管和开关存在通态压降, L_{r1} 和 L_{m1} 处于正向放电的状态, $i_{L_{r1}}$ 和 $i_{L_{m1}}$ 以 $I_{L_{m1a}}$ 为起点正向线性减小, $i_{L_{r1}}$ 和 $i_{L_{m1}}$ 的减小速率相等, 在 t_5 时刻, $i_{L_{r1}}$ 和 $i_{L_{m1}}$ 同时变化到零, $D_{S_{a1}}$ 关断, 流程 6 结束。

(7) 流程 7 ($t_5 \sim t_6$): 在 t_5 时刻, 关断 S_{a1} , 因为此时流过 S_{a1} 的电流已经等于零, 所以 S_{a1} 在关断时处于零电流软关断状态, 负载电流通过 S_1 实现续流。在该流程中辅助电路停止工作, 电路处于稳态。

(8) 流程 8 ($t_6 \sim t_7$): 在 t_6 时刻, 开通 S_{a2} , L_{r1} 和 L_{m1} 阻碍了 S_{a2} 发生开通动作时的电流快速变化, 因此 S_{a2} 在开通时处于零电流软开通状态, 与此同时, 关断 S_1 , 因为 S_1 并联了 C_1 , C_1 阻碍了 S_1 发生关断动作时的端电压快速变化, 所以 S_1 在关断时处于零电压软关断状态。在 S_{a2} 和 S_1 完成软开关切换动作之后, L_{r1}, C_1 和 C_2 进入谐振状态, C_2 处于正向放电状态, C_1 处于正向充电状态, L_{r1} 处于反向充电状态, 当 u_{C_1} 变化到 $nU_d/(n+1)$ 时, $i_{L_{r1}}$ 达到反向最大值 $-I_{L_{r1b}}$, 然后 L_{r1} 开始处于反向放电状态, $i_{L_{r1}}$ 以 $-I_{L_{r1b}}$ 为起点开始反向减小, C_2 继续处于正向放电状态, C_1 继续处于正向充电状态, 在 t_7 时刻, $i_{L_{r1}}$ 反向减小到 $-I_2$, u_{C_1} 增加到 U_d , u_{C_2} 减小到零, 流程 8 结束。

(9) 流程 9 ($t_7 \sim t_8$): 在 t_7 时刻, C_1, C_2 和 L_{r1} 谐振结束, 加在 L_{r1} 和 L_{m1} 两端的电压都为 $U_d/(n+1)$, L_{r1} 处于反向放电状态, L_{m1} 处于反向充电状态, $i_{L_{r1}}$ 以 $-I_2$ 为起点开始反向线性减小, $i_{L_{m1}}$ 继续反向线性增大, 在 t_8 时刻, $i_{L_{r1}}$ 和 $i_{L_{m1}}$ 同时变化到 $-I_{L_{m1b}}$, 流程 9 结束。

(10) 流程 10 ($t_8 \sim t_9$): 在 t_8 时刻, $i_{L_{r1}}$ 和 $i_{L_{m1}}$ 相等, 考虑到二极管和开关存在通态压降, L_{r1} 和 L_{m1} 反向放电, $i_{L_{r1}}$ 和 $i_{L_{m1}}$ 开始处于反向线性减小的状态, $i_{L_{r1}}$ 和 $i_{L_{m1}}$ 两者减小速率相同, 在 t_9 时刻, $i_{L_{r1}}$ 和 $i_{L_{m1}}$ 同时反向减小到零, $D_{S_{a2}}$ 断开, 流程 10 结束。

3 实验结果

图 1 所示的实验样机参数为额定输出功率 $P_0 = 3\text{kW}$, 三相负载电阻 $R_a = R_b = R_c = 3\Omega$, 三相负载电感 $L_a = L_b = L_c = 0.8\text{mH}$, $U_d = 200\text{V}$, S_{a1}, S_{a3} 和 S_{a5} 的触发脉冲占空比为 $\rho_{S_{a1}} = \rho_{S_{a3}} = \rho_{S_{a5}} = 0.293$, S_{a2}, S_{a6} 和 S_{a4} 的触发脉冲占空比为 $\rho_{S_{a2}} = \rho_{S_{a6}} = \rho_{S_{a4}} = 0.056$, 最大负载电流 $I_{0\text{max}} = 26\text{A}$, 开关频率 $f_c = 10\text{kHz}$, 输出频率 $f_0 = 50\text{Hz}$, 三相变压器等效谐振电感 $L_{r1} = L_{r2} = L_{r3} = 1.2\mu\text{H}$, 三相变压器等效磁化电感 $L_{m1} = L_{m2} = L_{m3} = 500\mu\text{H}$, 三相谐振电容 $C_1 \sim C_6 = 0.015\mu\text{F}$, 死区时间 $\Delta = 1\mu\text{s}$, 逆变器输出相电压

有效值为 55V.

图 5(a) 给出了一个开关周期内流过变压器所在支路的电流 i_{T_1} 以及 u_{c_1} 和 u_{c_2} 的实验波形, 可以看出实验波形与图 3 所示的理论工作波形的变化趋势基本相符, 同时根据 i_{T_1} 的实验波形能看出 i_{T_1} 在一个开关周期内能变化到零, 说明了变压器的磁化电流没有形成稳态环流, 变压器实现了去磁复位. 图 5(b) 和图 5(c) 分别为在满载和轻载下, 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, 如图 5(b) 和

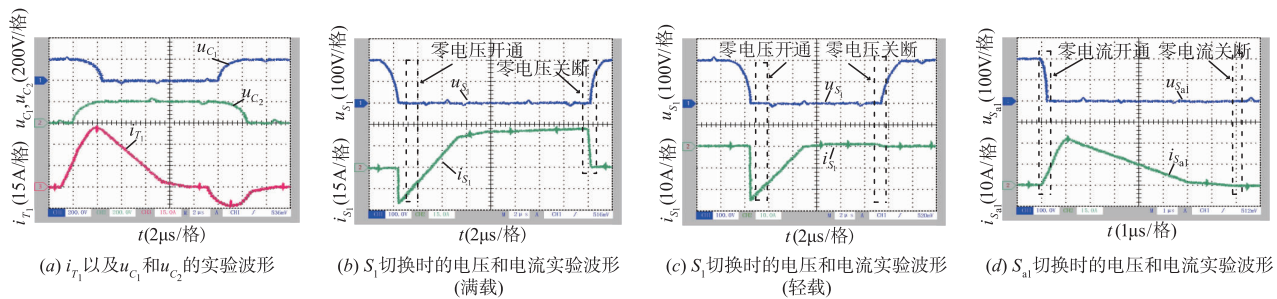


图5 实验波形

4 结论

本文提出了一种变压器辅助换流的新型谐振极逆变器拓扑结构, 相比于相关文献中提出的同类型拓扑结构, 其显著优势是每个开关周期中的变压器磁化电流可以自然变化到零, 克服了同类拓扑结构存在的变压器铁心易饱和的缺点, 而且主开关和辅助开关都能完成软切换. 通过实验验证得出如下结论: (1) 轻载和满载时, 逆变器的主开关能完成零电压软切换, 辅助开关能完成零电流软切换; (2) 流过变压器原边和副边绕组的电流在每个开关周期内可以自然衰减为零, 不存在稳态磁化电流, 变压器实现了去磁复位.

参考文献

- [1] Wang Qiang, Wang Youzheng. Resonant DC link soft-switching inverter with low-loss auxiliary circuit[J]. International Journal of Electronics, 2019, 106(10): 1602-1615.
- [2] 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)
- [3] 王强, 唐朝垠, 王天施, 等. 变压器辅助换流的谐振极型软开关逆变器[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(11): 73-81.

图 5(c) 所示, S_1 关断时, u_{s_1} 的上升速度受到了限制, 轻载和满载时都实现了 S_1 的零电压软关断切换; i_{s_1} 反向增大之前, u_{s_1} 已经变化到零, 所以轻载和满载时都实现了 S_1 的零电压软开通切换. 图 5(d) 为 S_{a1} 进行切换动作时的端电压 $u_{s_{a1}}$ 和流过的电流 $i_{s_{a1}}$ 的实验波形, 如图 5(d) 所示, S_{a1} 开通时, $i_{s_{a1}}$ 的上升速度受到了限制, 实现了 S_{a1} 的零电流软开通切换; 在 S_{a1} 关断之前, 流过 S_{a1} 的电流已经为零, 实现了 S_{a1} 的零电流软关断切换.

Wang Qiang, Tang Chaoyin, Wang Tianshi, et al. Resonant pole soft-switching inverter with transformer-assisted commutation [J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(11): 73-81. (in Chinese)

- [4] 王强, 唐朝垠, 王天施, 等. 一种可快速去磁复位变压器的新型辅助谐振变换极逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4672-4684.

Wang Qiang, Tang Chaoyin, Wang Tianshi, et al. A novel auxiliary resonant commutated pole inverter for fast demagnetizing and resetting transformer [J]. Proceeding of the CSEE, 2016, 36(17): 4672-4684. (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



徐有万 男, 1994年4月出生于江苏省淮安市, 现为天地(常州)自动化股份有限公司工程师, 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