

节能型单相全桥谐振极逆变器

王 强^{1,2}, 岳远韶^{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: 单相全桥逆变器处于硬开关状态时,随着开关频率的增大,开关损耗明显增大,影响逆变器效率的提高.为解决这一问题,提出了一种节能型单相全桥谐振极逆变器,在逆变器处于死区状态时,将要开通的主开关并联的谐振电容的电压能减小至零,主开关动作时能完成零电压软切换,双向辅助开关动作时能完成零电流软切换.讨论了电路的工作流程,实验结果表明主开关和辅助开关完成了软切换动作.该单相全桥软开关逆变器可以向高开关频率的场合推广应用.

关键词: 逆变器; 死区; 双向开关; 零电压开关; 零电流开关

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)06-1216-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.06.005

An Energy-Saving Single-Phase Full-Bridge Resonant Pole Inverter

WANG Qiang^{1,2}, YUE Yuan-shao^{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 a single-phase full-bridge inverter works in the hard-switching state, the switching loss will increase significantly with the increasing of switching frequency, so that it will affect the efficiency of the inverter. In order to solve this problem, an energy-saving single-phase full-bridge resonant pole inverter is proposed. When the inverter is in the dead state, the voltage across the resonant capacitor in parallel with the main switch can decrease to zero via the resonance of the auxiliary circuit. The main switch can achieve zero-voltage switching, and the bidirectional auxiliary switch can realize zero-current switching. The operation process of the circuit in a switching cycle is analyzed. The experimental results show that the main switch and auxiliary switch can realize soft-switching. Therefore, the single-phase full-bridge soft-switching inverter can be applied at high switching frequency.

Key words: inverter; dead zone; bidirectional switch; zero-voltage switching; zero-current switching

1 引言

软开关技术减小了逆变器由于高频化和大功率化而产生的各种不良影响,提高效率的同时保证了逆变器的可靠性,使逆变器具有更好的性能指标^[1,2].

单相全桥逆变器是逆变器中比较重要的一类,研究人员近些年提出了多种单相全桥软开关逆变器的拓扑结构^[3-8].但是现有的拓扑结构在直流电压利用率,辅助器件通态损耗和辅助开关器件的数量等方面都需要进一步完善.在直流电压利用率方面,文献^[3-5]提

出的单相全桥谐振直流环节软开关拓扑结构的直流环节电压会在辅助电路工作时出现零电压区间,这会降低逆变器的直流电压利用率.在辅助器件通态损耗方面,文献^[6,7]提出的单相全桥无源谐振极软开关拓扑结构的主功率传输通道上串接了无源辅助器件,其通态损耗会在逆变器输出功率增大时显著增大,影响逆变器效率的提高.在辅助开关器件的数量方面,文献^[8]提出的单相全桥有源谐振极软开关拓扑结构共需要4个辅助开关,辅助电路的器件数较多,不利于简化逆变器控制和降低辅助电路的硬件成本.

收稿日期:2017-09-10;修回日期:2017-09-21;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)

为提高单相全桥软开关逆变器的实用性,本文提出了一种新的节能型单相全桥谐振极逆变器,相比于同类型的单相全桥软开关逆变器,其拓扑结构具有以下显著特点:(1)辅助电路与逆变器负载并联,辅助电路器件较少,结构简单,而且没有辅助器件串接在逆变器的主功率传输通道上,辅助器件通态损耗小;(2)辅助电路将 2 个辅助开关的集电极接到一起构成了双向辅助开关来控制谐振电流的正反向流动.文中分析了电路在一个开关周期内的工作流程,最后在额定功率为 2kW 的实验样机上验证了该节能型单相全桥谐振极逆变器的性能.

2 电路结构及工作过程

2.1 电路结构

图 1 为该单相全桥谐振极逆变器主电路,该电路主要分为两部分.第一部分是全桥逆变电路,该部分电路主要由开关 $S_1 \sim S_4$,反并联二极管 $D_1 \sim D_4$ 构成.其中开关 S_1, S_4 为一组,同时导通或者截止; S_2, S_3 为一组,同时导通或者截止.第二部分即辅助谐振电路,该部分由辅助开关 S_{a1}, S_{a2} ,谐振电感 L_r ,谐振电容 $C_{r1} \sim C_{r4}$ 组成.在分析电路时,作以下假设^[9-11]:(1)各器件都是理想器件;(2)阻感性负载中的电感值远远大于辅助电路中的电感值,在一个开关周期内负载电流是恒定的,负载可被看作是恒流源.各部分电压和电流的正方向已在图 1 中标出.

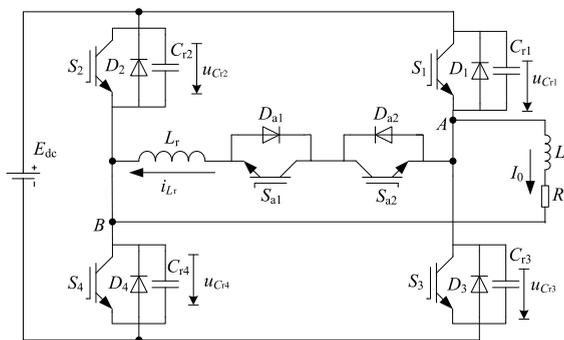


图1 节能型单相全桥谐振极逆变器主电路

2.2 工作过程

有 8 个流程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 2 所示,图 3 为各流程等效电路图.

(1) 流程 1 ($t \sim t_0$): 电路工作在稳定状态,电源通过主开关 S_1, S_4 给负载提供能量.

(2) 流程 2 ($t_0 \sim t_1$): 在 t_0 时刻,开通 S_{a1} ,由于 L_r 限制了 S_{a1} 发生开通动作时的电流上升速度,所以 S_{a1} 在开通时处于零电流软开通状态.在该流程中,电源电压 E_{dc} 施加在 L_r 两端, i_{L_r} 以恒定的速度增大,当 i_{L_r} 在 t_1 时刻增

大到阈值 I_{b1} 时,本流程结束.

(3) 流程 3 ($t_1 \sim t_2$): 在 t_1 时刻,关断 S_1, S_4 ,因 C_{r1}, C_{r4} 限制了 S_1, S_4 关断时的电压变化速度,所以 S_1, S_4 在关断时处于零电压软关断状态.电路进入死区状态, L_r 与谐振电容 $C_{r1} \sim C_{r4}$ 开始谐振, C_{r2}, C_{r3} 放电, C_{r1}, C_{r4}, L_r 被充电, $u_{C_{r2}}, u_{C_{r3}}$ 减小, $u_{C_{r1}}, u_{C_{r4}}, i_{L_r}$ 增大.在 t_2 时刻, $u_{C_{r1}}, u_{C_{r4}}$ 增大到 E_{dc} , $u_{C_{r2}}, u_{C_{r3}}$ 减小到零时,本流程结束.

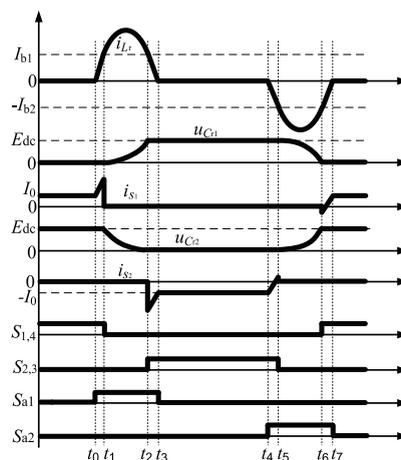


图2 谐振换流期间的理论工作波形

(4) 流程 4 ($t_2 \sim t_3$): 在 t_2 时刻, $u_{C_{r2}}, u_{C_{r3}}$ 减小到零,谐振过程停止,此时开通 S_2, S_3 ,可以实现零电压开通.然后存储在电感 L_r 中的剩余能量开始通过二极管 D_2, D_3 回馈给直流电源, i_{L_r} 开始线性减小,当其减小至零时,流程 4 结束.

(5) 流程 5 ($t_3 \sim t_4$): 在 t_3 时刻, i_{L_r} 减小至零,负载电流通过二极管 D_2, D_3 续流,电路处于稳态.

(6) 流程 6 ($t_4 \sim t_5$): 在 t_4 时刻, S_{a2} 被开通,在 L_r 的作用下,限制了 S_{a2} 开通瞬间的电流的上升率, S_{a2} 实现了零电流开通.从 t_4 时刻开始, L_r 被充电, i_{L_r} 反向线性增大,在 t_5 时刻 i_{L_r} 反向线性增大到 I_{b2} ,本流程结束.

(7) 流程 7 ($t_5 \sim t_6$): 在 t_5 时刻,关断 S_2, S_3 ,因 C_{r2}, C_{r3} 限制了 S_2, S_3 关断时的电压变化速度,所以 S_2, S_3 在关断时处于零电压软关断状态.电路进入死区状态, L_r 与谐振电容 $C_{r1} \sim C_{r4}$ 开始谐振, C_{r2}, C_{r3}, L_r 被充电, C_{r1}, C_{r4} 放电, $u_{C_{r2}}, u_{C_{r3}}, i_{L_r}$ 增大, $u_{C_{r1}}, u_{C_{r4}}$ 减小.当 $u_{C_{r2}}, u_{C_{r3}}$ 增大至 $E_{dc}/2$ 时, i_{L_r} 变化到反向极值.此后 L_r 释放电能, i_{L_r} 处于反向减小状态.在 t_6 时刻, $u_{C_{r2}}, u_{C_{r3}}$ 增大到 E_{dc} , $u_{C_{r1}}, u_{C_{r4}}$ 减小到零时,本流程结束.

(8) 流程 8 ($t_6 \sim t_7$): 在 t_6 时刻,谐振过程停止, $u_{C_{r1}}, u_{C_{r4}}$ 等于零, S_1, S_4 可以实现零电压开通.从 t_6 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_7 时刻变化为零时,本流程结束.然后电路返回流程 1,进入下一个开关周期.

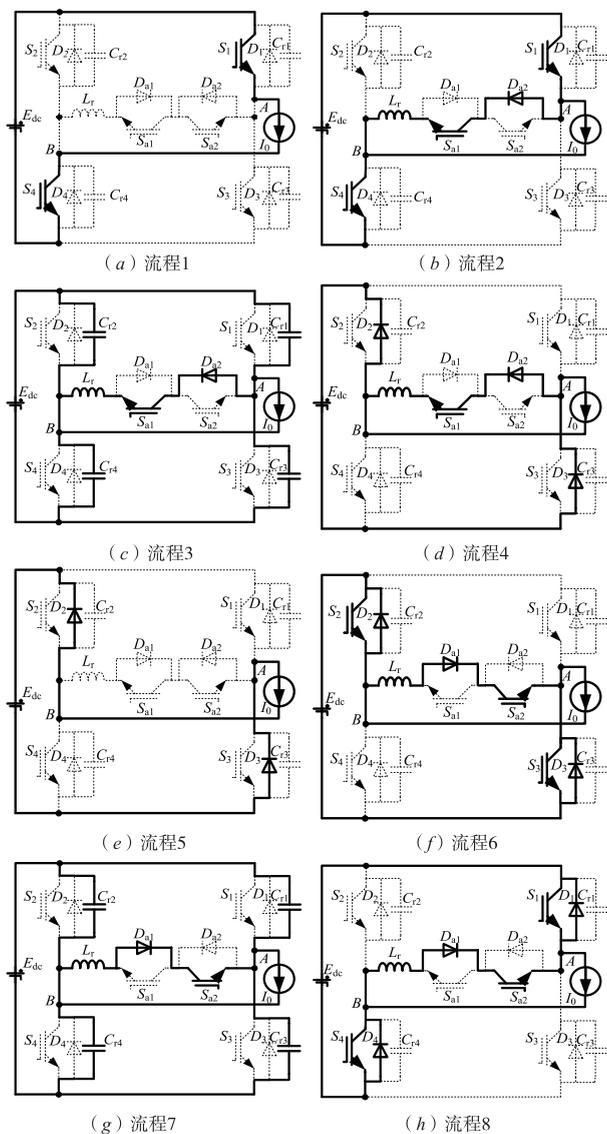


图3 各工作流程的等效电路

3 实验结果

实验参数选取: 直流电源电压 $E_{dc} = 350V$, 额定输出功率 $P_0 = 2kW$, 逆变器输出电流峰值 $I_{0max} = 22A$, 输出电压有效值 $U_0 = 123V$, 额定负载电阻 $R = 8\Omega$, 谐振电容 $C_{r1} = C_{r2} = C_{r3} = C_{r4} = 44nF$, 谐振电感 $L_r = 9\mu H$, 滤波电感 $L_f = 1mH$, 滤波电容 $C_f = 4.7\mu F$, 逆变器死区时间 $\Delta = 2\mu s$, 辅助开关 S_{a1} 、 S_{a2} 触发脉冲占空比分别为 $\rho_{Sa1} = 0.0447$, $\rho_{Sa2} = 0.0662$, 谐振电感电流阈值分别为 $I_{h1} = 24A$, $I_{h2} = 24A$, 开关频率 $f_c = 20kHz$, 输出频率 $f_0 = 50Hz$.

图4(a)为电路特征工作实验波形, 基本符合图2的理论特征波形; 图4(b)为单相全桥软开关逆变器的输出电流 i_0 的实验波形, 输出频率为 50Hz, 能看到波形

比较光滑, 是良好的正弦波. 图4(c)为单相全桥逆变器的主开关 S_1 进行状态切换时的端电压 u_{S_1} 和所流经的电流 i_{S_1} 的实验波形, 可知 S_1 开通前, u_{S_1} 已先降到零, 所以 S_1 在开通过程中完成了零电压软开通动作; 当 S_1 关断时, 电压变化率明显低于硬关断时的电压变化率, 所以 S_1 在关断过程中完成了零电压软关断动作. 图4(d)为逆变器辅助开关 S_{a1} 进行状态切换时的端电压 $u_{S_{a1}}$ 和所流经的电流 $i_{S_{a1}}$ 的实验波形, 可知 S_{a1} 开通时电压和电流同时变化, 流过 S_{a1} 的电流以较低的变化率缓慢增大, 完成了零电流软开通; S_{a1} 关断前电流 $i_{S_{a1}}$ 已经降到零, 完成了零电流软关断.

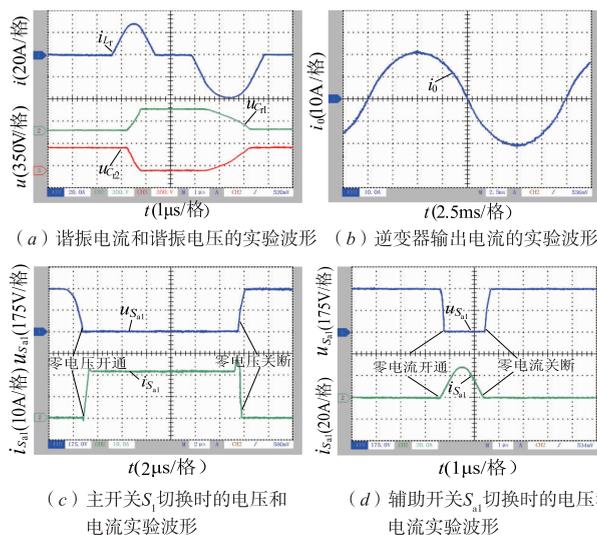


图4 实验波形

4 结论

本文设计了一种单相全桥零电压开关谐振极逆变器, 该逆变器显著特点是辅助电路结构简单, 辅助器件都没有被设置在逆变器主功率传输线路上, 限制了辅助电路的通态损耗, 而且利用双向辅助开关触发辅助电路工作, 来实现逆变器处于死区状态时, 将要开通的主开关并联的谐振电容的电压能周期性的下降到零, 为主开关提供零电压开通条件, 该双向辅助开关可以采用固定占空比控制, 利于简化控制. 经实验验证得到的结论如下: (1) 逆变器主开关在切换过程中能完成零电压开关; (2) 在辅助电路参与换流时, 辅助开关在切换过程中能完成零电流开关; (3) 逆变器输出电流波形为光滑正弦波, 增设的辅助电路对逆变器的输出无影响. 对于研发具有高开关频率和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] 王强, 刘岩松, 陈祥雪, 等. 基于单储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)
- [2] 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)
- [3] Gurunathan R, Ashoka K S B. Zero-voltage switching DC link single-phase pulsewidth-modulated voltage source inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(5): 1610 – 1618.
- [4] Chien-Ming Wang. A novel soft-switching single-phase AC-DC-AC converter using new ZVS-PWM strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22 (5): 1941 – 1948.
- [5] 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. (in Chinese)
- [6] Mangesh Borage, Sunil Tiwari, Swaran Kotaiah. A passive auxiliary circuit achieves zero-voltage-switching in full-bridge converter over entire conversion range [J]. IEEE Power Electronics Letters, 2005, 3(4): 141 – 143.
- [7] K Mark Smith Jr, Keyue Ma Smedley. Lossless passive soft-switching methods for inverters and amplifiers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(1): 164 – 173.
- [8] T H Chen, C M Liaw. Soft-switching inverter for electrodynamic shaker [J]. IEE Proc-Electr Power Appl, 1999, 146 (5): 515 – 523.
- [9] 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)
- [10] 王强, 刘岩松, 陈祥雪, 等. 具有低能耗辅助电路的并联谐振直流环节逆变器[J]. 电子学报, 2014, 42(7): 1369 – 1373.

Wang Qiang, Liu Yansong, Chen Xiangxue, et al. Parallel resonant DC link inverter with low-loss auxiliary circuit [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42 (7): 1369 – 1373. (in Chinese)

- [11] 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)

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