

无源器件辅助换流的单相全桥软开关逆变器

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: 为提高单相全桥逆变器的转换效率, 提出了一种无源器件辅助换流的单相全桥软开关逆变器拓扑结构, 通过在逆变器桥臂上增加辅助谐振电路, 实现了开关器件的软开关动作. 辅助谐振电路中无辅助开关器件, 只含有电感、电容和二极管等少量无源器件, 这有利于降低辅助电路的成本, 而且不会使逆变器的控制策略复杂化. 此外, 在逆变器处于死区状态时, 负载电流能通过辅助谐振电路续流, 可以改善逆变器输出电流波形的畸变率, 减小了死区的不利影响. 文中详细分析了电路的工作过程, 在功率为 4kW 的单相实验样机上进行了实验验证, 获得的实验结果表明在轻载和满载时逆变器的开关器件都能实现软开关, 逆变器输出电流波形的畸变率都得到了改善. 因此, 该无源器件辅助换流的单相全桥软开关拓扑结构对于提高逆变器的性能具有重要意义.

关键词: 逆变器; 无源; 软开关; 死区; 开关损耗

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)09-2295-04
电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.09.036

Single-Phase Full-Bridge Soft-Switching Inverter with Passive Device-Assisted Commutation

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: A single-phase full-bridge soft-switching inverter with passive device-assisted commutation is proposed to improve conversion efficiency of the single-phase full-bridge inverter. The soft-switching action of the switch devices is achieved by adding an auxiliary resonant circuit to bridge arms of the inverter. There is no auxiliary switch device in the auxiliary resonant circuit but few passive devices such as inductances, capacitances, diodes, and so on, which is helpful to reduce the cost of the auxiliary circuit and can't complicate the control strategy of the inverter. In addition, freewheeling of load current can be realized via the auxiliary circuit and the distortion ratio of output current waveforms of the inverter is reduced when the inverter is in the dead state, which reduces the effect of dead-time on the output current of the inverter. The operation process of the circuit is analyzed in detail. The experimental verification is carried out on a 4kW one-phase laboratory prototype. Experimental results verify that the switch devices of the inverter can achieve soft-switching in both light load and full load, the distortion ratio of output current waveforms of the inverter is improved. Therefore, the single-phase full-bridge soft-switching topology with passive device-assisted commutation has an important significance for improving the performance of inverter.

Key words: inverter; passive; soft-switching; dead-time; switching loss

1 引言

软开关技术在升频降耗方面的效果非常显著, 在电力电子逆变装置中采用软开关技术不仅能显著提高

逆变器的效率、功率密度和稳定性, 而且还能大大减小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^[1,2].

近些年, 研究人员提出了多种单相全桥软开关逆

收稿日期: 2017-03-30; 修回日期: 2017-10-24; 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)

变器拓扑结构. 文献[3]提出的单相全桥软开关逆变器都在辅助谐振电路中设置了有源辅助开关器件, 虽然可以实现软开关切换, 但是增加了辅助电路的硬件成本, 同时使逆变器的控制方法复杂化. 文献[4~6]提出的单相全桥软开关逆变器的辅助电路无辅助开关器件, 有利于降低硬件成本和简化控制, 但是仍然需要进一步改进, 其中文献[4,5]中的辅助电路中都设置了变压器, 变压器剩磁的累加会使变压器铁芯饱和; 文献[6]的辅助电路里没有设置分压电容和变压器, 无中性点电位变化问题和剩磁累加问题, 但是当开关器件关断以后, 其承受的电压将大大高于直流电源电压.

本文提出一种新型无源器件辅助换流的单相全桥软开关逆变器, 弥补了相关文献中电路的缺陷. 文中详细分析了电路的换流过程, 最后通过实验验证了该软开关逆变器的性能.

2 电路结构及工作过程

2.1 电路结构

单相全桥软开关逆变器主电路如图 1 所示. 辅助谐振电路除了由开通吸收电感 L_r 和关断续流电容 C_{r1} 、 C_{r2} 组成之外, 还包含充当无源电压源的大容量储能电容 C_s , 能量回馈电感 L_{s1} 和 L_{s2} , 箝位二极管 D_1 、 D_2 、 D_3 和 D_4 , 能量回馈二极管 D_5 和 D_6 . 桥式逆变器由主开关 $S_1 \sim S_4$ 以及其反并联二极管 $D_{s1} \sim D_{s4}$ 组成.

在分析电路工作过程时, 作出以下假设: (1) 所有元件都看作理想元件; (2) 阻感性负载中的电感值远远大于辅助电路中的电感值, 负载电流在一个开关周期中保持不变, 即可将该阻感性负载看成是电流大小恒为 I_0 的恒流源; (3) 电容 C_s 的电容值很大, 其两端电压值变化幅度很小, 可假定恒为 E , E 相对于 U_d 很小, 假设 $U_d = (10 \sim 20)E$; (4) 简化分析时按 $C_{r1} = 2C_{r2}$ 考虑. 电容 C_{r1} 和 C_{r2} 两端电压 u_{Cr1} 和 u_{Cr2} 的初始值分别为 $-E$ 和 U_d , C_{r1} 和 C_{r2} 电容值都远小于 C_s 电容值. 图 1 中箭头方向为电路中各物理量的参考正方向, 有 8 个模式被包含在电路每个开关周期的工作过程中. 图 2 给出了电路特征波形, 图 3 给出了各模式等效电路图.

2.2 工作过程

电路工作过程以负载电流的正方向为例进行分析, 假设模式 1 为电路初始状态, 各模式如下所述:

模式 1 ($t_0 \sim t_1$): 逆变器处于稳态, S_1 和 S_4 处于导通状态, 直流电源经 L_r 、 S_1 和 S_4 对负载提供恒定电流 I_0 , 同时, 大容量电容 C_s 经 S_1 和 D_5 对 L_{s1} 持续供电. 在本模式中, $i_{Lr} = I_0$, $u_{Cr1} = -E$, $u_{Cr2} = U_d$.

模式 2 ($t_1 \sim t_2$): 电路在本模式中有两个回路, 回路 1 为 $L_{s1} \rightarrow D_5 \rightarrow D_2 \rightarrow C_{r1} \rightarrow L_{s1}$, 在此回路中, L_{s1} 对 C_{r1} 充电; 回路 2 为 $C_{r2} \rightarrow D_3 \rightarrow L_r \rightarrow C_s \rightarrow D_2 \rightarrow C_{r1} \rightarrow I_0 \rightarrow C_{r2}$, 在此回

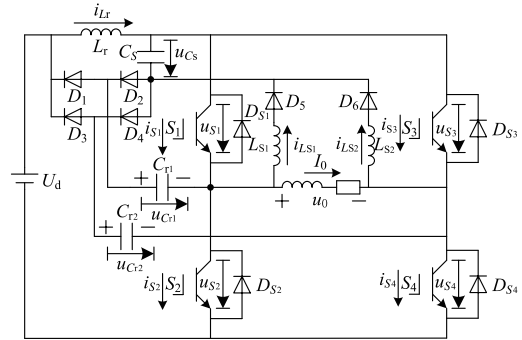


图1 无源器件辅助换流的单相全桥软开关逆变器主电路

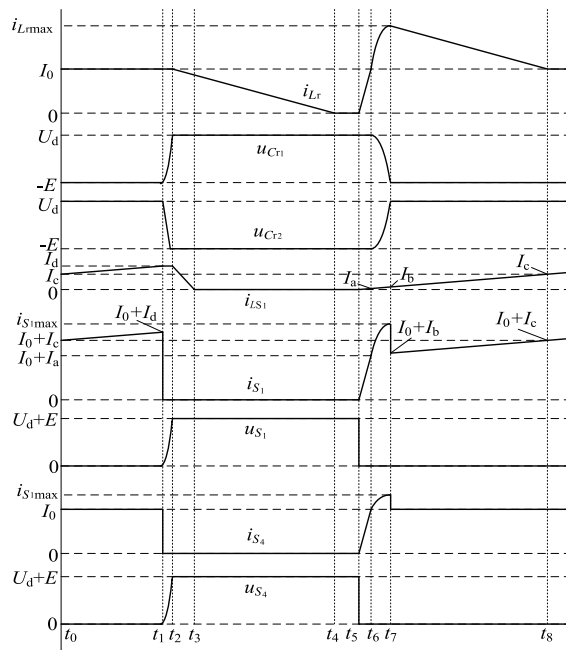


图2 电路的特征波形

路中, C_{r2} 放电, C_{r1} 被充电, i_{Lr} 恒等于 I_0 . 在 t_1 时刻, S_1 和 S_4 同时关断, S_2 和 S_3 同时开通, 此时, 回路 1 中 L_{s1} 与 C_{r1} 发生谐振, i_{Ls1} 持续减小, u_{Cr1} 持续增大, 当 u_{Cr1} 增大到 U_d 时, 该回路工作结束工作; 回路 2 中 u_{Cr2} 以恒定的变化率减小, u_{Cr1} 持续增大, 当 u_{Cr2} 减小到 $-E$, u_{Cr1} 增加到 U_d 时, 该回路工作结束工作. 因为 C_{r1} 和 C_{r2} 分别限制了 S_1 和 S_4 关断瞬间的电压变化率, 所以实现了 S_1 和 S_4 的零电压关断.

模式 3 ($t_2 \sim t_3$): 电路在本模式中有三个回路, 回路 1 为 $I_0 \rightarrow D_{s3} \rightarrow C_s \rightarrow D_2 \rightarrow D_1 \rightarrow U_d \rightarrow D_{s2} \rightarrow I_0$, I_0 通过此回路得到续流; 回路 2 为 $L_r \rightarrow C_s \rightarrow D_2 \rightarrow D_1 \rightarrow L_r$, 在此回路中, L_r 对 C_s 充电; 回路 3 为 $L_{s1} \rightarrow D_2 \rightarrow D_1 \rightarrow U_d \rightarrow D_{s2} \rightarrow L_{s1}$, 在此回路中, L_{s1} 向 U_d 反馈能量. 在 t_2 时刻, 当 u_{Cr1} 增加到 U_d , u_{Cr2} 减小到 $-E$ 时, S_2 两端电压 $u_{S2} = U_d - u_{Cr1} = 0$, S_3 两端电压 $u_{S3} = u_{Cr2} + E = 0$, D_{s2} 和 D_{s3} 导通, 回路 1 导通, I_0 得到续流; 在 t_2 时刻, 回路 2 中 L_r 开始向 C_s 充电, 当 i_{Lr} 减小到零时, 该回路结束工作; 同时, 回路 3 中

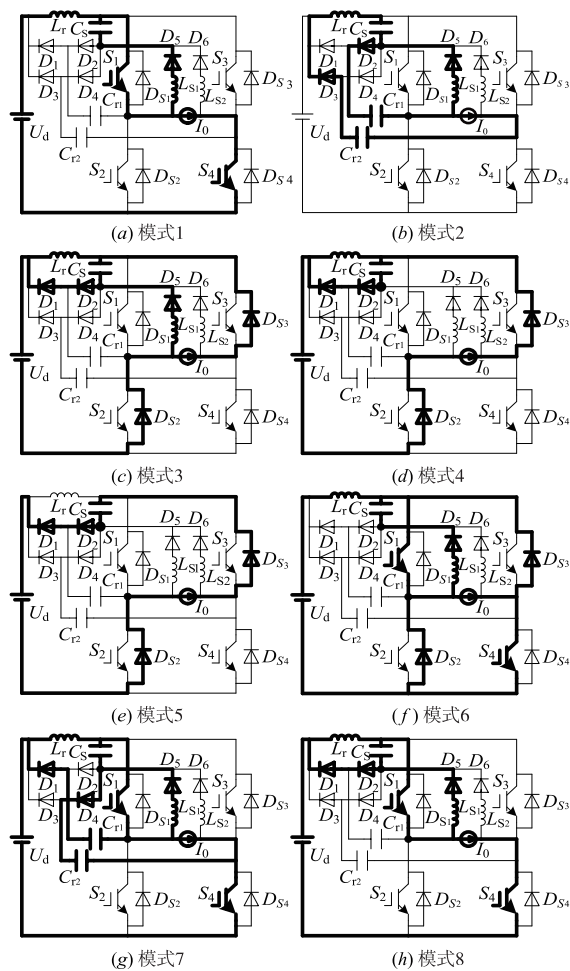


图3 各工作模式等效电路

L_{S1} 也开始向 U_d 反馈能量,当 $i_{L_{S1}}$ 减小到零时,该回路结束工作。

模式4($t_3 \sim t_4$):本模式中负载电流 I_0 继续经回路 $I_0 \rightarrow D_{S3} \rightarrow C_s \rightarrow D_2 \rightarrow D_1 \rightarrow U_d \rightarrow D_{S2} \rightarrow I_0$ 续流, L_r 继续对 C_s 充电,当 i_{L_r} 线性减小到零时,本模式工作结束。注:当轻载时,因为模式3中回路2时间较回路3短,所以模式4不存在,即 L_r 在模式3中就对 C_s 充电结束。

模式5($t_4 \sim t_5$):本模式中负载电流 I_0 继续经回路 $I_0 \rightarrow D_{S3} \rightarrow C_s \rightarrow D_2 \rightarrow D_1 \rightarrow U_d \rightarrow D_{S2} \rightarrow I_0$ 续流。

模式6($t_5 \sim t_6$):在 t_5 时刻, S_1 和 S_4 同时开通, S_2 和 S_3 同时关断, U_d 开始经回路 $U_d \rightarrow L_r \rightarrow S_1 \rightarrow I_0 \rightarrow S_4 \rightarrow U_d$ 对负载供电,因在 L_r 作用下,有电流通过 D_{S2} 和 S_4 (D_{S3} 和 S_1) 流回负载。此时, C_s 经回路 $C_s \rightarrow S_1 \rightarrow L_{S1} \rightarrow D_5 \rightarrow C_s$ 也对 L_{S1} 开始充电。因为在 L_r 作用下,流过 S_1 和 S_4 同的电流变化率被降低,并且 t_5 时刻 L_{S1} 中电流为零,所以 S_1 和 S_4 同在开通过程中完成了零电流开通,因为 S_2 和 S_3 关断时有电流流过 D_{S2} 和 D_{S3} ,所以 S_2 和 S_3 是在零电压零电流的条件下完成关断。本模式中 i_{L_r} 和 $i_{L_{S1}}$ 都是线性增大,流过 D_{S2} 和 D_{S3} 的电流以恒定变化率减小,当 i_{L_r}

增大到 I_0 时, D_{S2} 和 D_{S3} 自然截止,本模式工作结束。

模式7($t_6 \sim t_7$):电路在本模式中有四个回路,回路1为 $U_d \rightarrow L_r \rightarrow S_1 \rightarrow I_0 \rightarrow S_4 \rightarrow U_d$,在此回路中, U_d 对负载稳定供电;回路2为 $C_{r1} \rightarrow D_1 \rightarrow L_r \rightarrow S_1 \rightarrow C_{r1}$,在此回路中, L_r 与 C_{r1} 谐振, C_{r1} 对 L_r 充电;回路3为 $U_d \rightarrow L_r \rightarrow C_s \rightarrow D_4 \rightarrow C_{r2} \rightarrow S_4 \rightarrow U_d$,在此回路中, L_r 与 C_{r2} 产生谐振, U_d 对 L_r 和 C_{r2} 充电;回路4为 $U_d \rightarrow L_r \rightarrow S_1 \rightarrow L_{S1} \rightarrow D_5 \rightarrow D_4 \rightarrow C_{r2} \rightarrow S_4 \rightarrow U_d$,在此回路中, U_d 对 L_{S1} 和 C_{r2} 充电。在 t_6 时刻,回路2中 C_{r1} 对 L_r 充电,当 $u_{C_{r1}}$ 从 U_d 减小到 $-E$ 时,此回路工作结束;回路3中在 L_r 和 C_{r2} 谐振的同时, U_d 对 L_r 和 C_{r2} 同时充电,当 $u_{C_{r2}}$ 从 $-E$ 增大到 U_d 时,此回路工作结束;回路4中 U_d 对 L_{S1} 和 C_{r2} 同时充电,当 $u_{C_{r2}}$ 从 $-E$ 增大到 U_d 时,此回路工作结束。回路2、回路3和回路4都工作结束时,本模式工作结束。

模式8($t_7 \sim t_8$):在本模式中, U_d 通过回路 $U_d \rightarrow L_r \rightarrow S_1 \rightarrow I_0 \rightarrow S_4 \rightarrow U_d$ 继续对负载稳定供电。在 t_7 时刻, L_r 开始与 C_s 谐振,并对 C_s 充电,同时, C_s 与 L_{S1} 谐振,并对 L_{S1} 充电,这是一个复杂的谐振过程。由于 C_s 是大容量电容,则可将该过程看做 L_r 对 C_s 充电,同时 C_s 对 L_{S1} 充电, i_{L_r} 线性减小, $i_{L_{S1}}$ 线性增大,当 i_{L_r} 减小到 I_0 时,本模式工作结束。注:如果 i_{L_r} 没有降到 I_0 时, S_1 和 S_4 就同时关断,则电路状态直接返回模式2,否则,电路状态返回模式1。

至此,负载电流为正的情况下的一个完整的开关周期工作过程结束,接着电路又进入初始状态开始下个周期的工作。负载电流为负的情况下,反馈电感 L_{S2} 参与电路工作,工作情况与 L_{S1} 相似,整个电路工作过程与负载电流为正时相类似,这里不再赘述。

3 实验结果

按照图1所示主电路,研制了一台额定功率为4kW的单相实验样机。样机参数如下:直流电源电压 $U_d = 400V$,负载电阻 $R_0 = 12\Omega$,负载电感 $L_0 = 1mH$,额定输出功率 $P_0 = 4kW$,最大负载电流 $I_{0max} = 25A$,开通吸收电感 $L_r = 40\mu H$,能量回馈电感 $L_{S1} = 135\mu H$,关断续流电容 $C_{r1} = 0.1\mu F$, $C_{r2} = 50nF$,能量存储电容 $C_s = 20\mu F$,额定输出频率 $f_0 = 50Hz$,开关频率 $f_c = 10kHz$,死区时间 $\Delta = 1\mu s$,

实验波形如图4所示,图4(a)和图4(b)分别为满载和轻载情况下,单相全桥软开关逆变器的开关 S_1 进行切换时的端电压 u_{S1} 和所流经的电流 i_{S1} 的实验波形,由图可见, S_1 在满载和轻载条件下开通时,所流过的电流 i_{S1} 以较低的变化率缓慢上升, S_1 实现了零电流开通;由图4(a)和图4(b)还可看出当 S_1 关断时 u_{S1} 变化率较硬开关低很多,因此在满载和轻载条件下, S_1 实现了零电压关断。图4(c)和图4(d)分别为在输出频率5Hz

时,单相全桥硬开关逆变器和本文设计的单相全桥软开关逆变器的输出电流 i_h 和 i_s 的实验波形,可以看出软开关逆变器在低输出频率时的输出电流的波形基本

为光滑的正弦波,而硬开关逆变器在低输出频率时的输出电流的波形有明显的畸变.

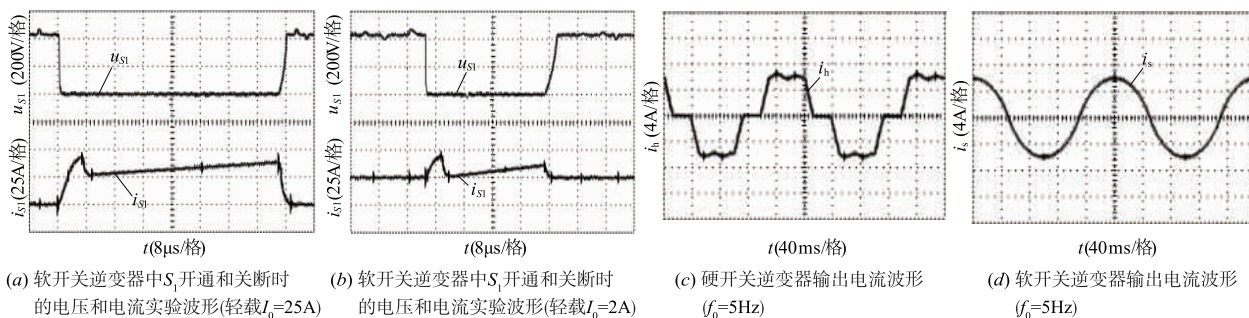


图4 实验波形

4 结论

提出了一种无源器件辅助电流的新型单相全桥软开关逆变器,与同类型的单相全桥软开关逆变器相比,具有以下优势:其辅助电路无大体积的分压电容,变压器和耦合电感,而且开关器件承受电压与直流电源电压近似相等,负载电流在逆变器处于死区状态时可以通过辅助电路续流,有利于降低逆变器输出电流波形的畸变率.通过在4kW样机上的实验验证得出如下结论:(1)电路特征工作实验波形的变化趋势符合理论分析,逆变器稳态运行良好;(2)逆变器处于轻载和满载时,开关器件完成了零电流软开通和零电压软关断;(3)在低输出频率下,逆变器输出电流波形为光滑的正弦波,相比于硬开关逆变器,电流波形畸变率明显降低;本文提出的无源器件辅助换流的软开关逆变器拓扑结构对于改善逆变器效率和降低死区状态对逆变器输出电能的负面影响具有重要参考价值.

参考文献

- [1] 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 Electronic Sinica, 2014, 42(11): 2321-2324. (in Chinese)
- [2] 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 Electronic Sinica, 2015, 43(10): 2133-2136. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Deng Y, Ye H Y, He X N. Unified passive circuit for snubber energy recovery in UPS inverters [A]. Proceedings of IEEE Telecommun Energy Conference [C]. Phoenix, USA: IEEE, 2000.

作者简介



王强(通讯作者)男,1981年10月出生,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