

新型单相低能耗半桥逆变器

王 强^{1,2}, 王有政^{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: 为实现单相半桥逆变器的高效率运行,设计了一种新型单相低能耗半桥逆变器. 在逆变器工作过程中,主开关和辅助开关均能完成零电压软切换,逆变器主开关采用高频金属氧化物半导体场效应晶体管(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET)时,都能实现零损耗切换,消除了 MOSFET 内部结电容导致的容性开通损耗. 文中具体分析了电路工作过程. 在额定功率为 1kW 样机上的实验结果表明开关器件都实现了软切换. 因此该半桥软开关逆变器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;半桥;低能耗;零电压开关;高效率

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)03-0779-04

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

DOI: 10.12263/DZXB.20181052

A Novel Single-Phase Low-Energy Half-Bridge Inverter

WANG Qiang^{1,2}, WANG You-zheng^{1,2}, WANG Tian-shi^{1,2}, LIU Xiao-qin^{1,2}

(1. College of Information and Control Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun, Liaoning 113001, China;
2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Petrochemical Process Control, Fushun, Liaoning 113001, China)

Abstract: In order to realize the operation of a single-phase half-bridge inverter with high-efficiency, a novel single-phase low-energy half-bridge inverter is designed. In the working process of the inverter, both the main switch and the auxiliary switch can achieve zero-voltage soft switching. When the high frequency Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) is used as the main switch of the inverter, it can achieve zero-loss switching, which eliminates capacitive turn-on loss caused by the junction capacitance inside the MOSFET. In this paper, the working process of circuit is analyzed in detail. Experimental results on a prototype with rated power of 1 kW show that all switching devices achieve soft switching. Therefore, the topology of the half-bridge soft-switching inverter is of great significance to improve the performance of the inverter.

Key words: inverter; half-bridge; low-energy; zero-voltage switching; high-efficiency

1 引言

随着新能源及光伏并网发电技术的发展,如何提高逆变器效率成为现代电力电子变流技术领域研究的热点. 当逆变器处于传统硬开关工作模式时,其工作效率低、开关损耗大、谐波和噪声污染严重、电磁干扰增加,这会导致逆变器很难保持长时间的稳定运行. 软开关谐振变频技术可以有效解决上述问题,其通过增设辅助谐振电路,使功率开关器件完成零电流或者零电压软切换,使逆变装置向更优的性能指标方向发展^[1,2].

国内外学者已设计了多种能应用到单相半桥逆变器的辅助电路^[3-5]. 因为单相半桥逆变器主要应用在小功率领域,所以 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) 更适合作为单相半桥逆变器的开

关器件. MOSFET 内部存在结电容,会导致容性开通损耗,所以实现零电压软开通对于在单相半桥逆变器中应用 MOSFET 具有重要意义,但是文献[3~5]的逆变器的主开关和辅助开关不能都实现零电压软开通.

为使单相半桥逆变器向高频化和节能化发展,本文提出了一种新型单相低能耗半桥逆变器,其具有以下特点:(1)逆变器的开关器件均能实现零电压软开关. 因此,可以统一使用高频 MOSFET 作为电路中的开关器件.(2)逆变器在每个开关周期只需要切换 1 个主开关和 1 个辅助开关,而且辅助开关触发脉冲占空比为与负载电流无关的固定值,使逆变器控制简单化. 文中详细分析了电路的工作流程,在额定功率为 1 kW 的实验样机上的实验结果证明了该单相低能耗半桥逆变器的性能.

2 电路拓扑与工作流程分析

2.1 电路拓扑

图1给出了新型单相低能耗半桥逆变器电路拓扑,由直流电源 U_{d1} 、 U_{d2} ,辅助谐振电路和单相半桥逆变电路组成,其中辅助谐振电路由2个谐振电感 L_{S1} 和 L_{S2} ,1个充当电源作用的电容 C_s ,3个谐振电容 C_a 、 C_1 和 C_2 ,1个辅助开关 S_a 及其反并联二极管 D_a 组成.半桥逆变电路是由主开关 $S_1\sim S_2$ 及其反并联二极管 $D_1\sim D_2$,负载电感 L 和负载电阻 R 组成.

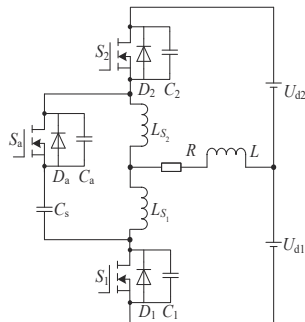


图1 新型单相低能耗半桥逆变器主电路

2.2 电路的工作流程分析

在电路分析中假设:(1)器件都工作在理想状态;(2)负载电感值足够大,在一个开关周期内的负载电流可视为固定值,逆变器输出端可看作与恒流源相连;(3) C_s 的电容值远大于谐振电容值, C_s 可以等效为恒压源,电压为 U_{Cs} .图1所示的拓扑结构可等效为图2所示电路,各部分电压和电流的正方向已在图2中标出.

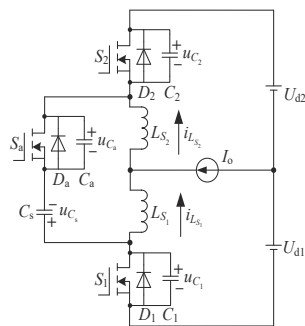


图2 新型单相低能耗半桥逆变器等效电路

9个流程被包含在电路每个开关周期的工作过程,图3给出了电路谐振换流期间的理论工作波形,图4为各工作流程的等效电路图.

(1)流程1($t_0\sim t_1$):本流程为初始流程,主开关 S_1 和辅助开关 S_a 处于导通状态, L_{S1} 、 L_{S2} 两者承受的电压和始终等于 U_{Cs} ,直流电源 U_{d1} 和电容 C_s 分别向电感 L_{S1} 和 L_{S2} 转移能量,电感 L_{S1} 和 L_{S2} 处于充电状态, i_{LS1} 从 $-I_0$ 开始正向线性增加, i_{LS2} 从零开始正向线性增加,流过主开关 S_1 的电流

大小始终等于 I_0 .在 t_1 时刻,当流过电感 L_{S1} 的电流 i_{LS1} 等于 I_1-I_0 ,流过电感 L_{S2} 的电流 i_{LS2} 等于 I_1 时,流程1结束.

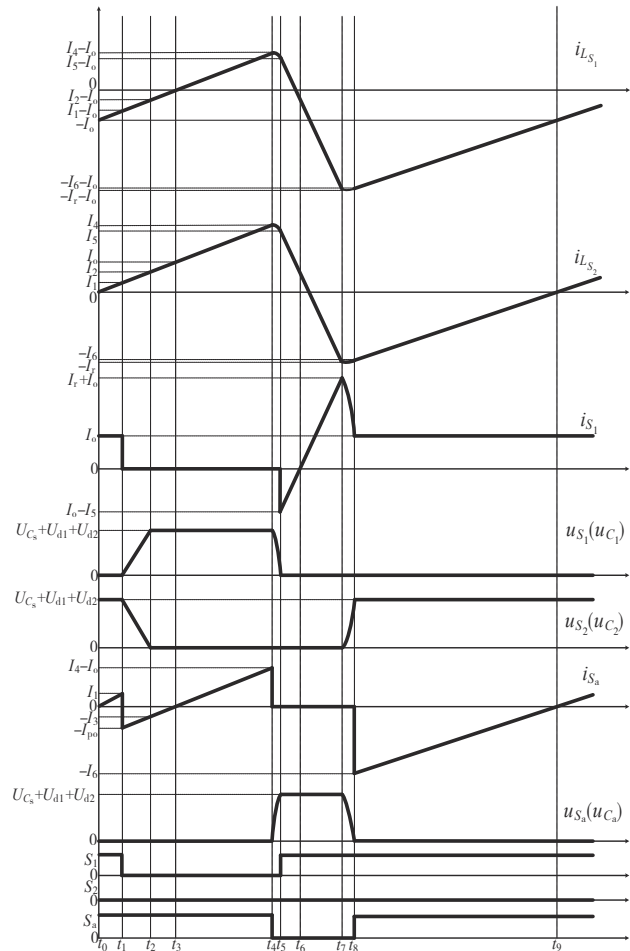


图3 谐振换流期间的理论工作波形

(2)流程2($t_1\sim t_2$): t_1 时刻,关断主开关 S_1 ,因为主开关 S_1 并联了电容 C_1 ,电容 C_1 限制了主开关 S_1 发生关断动作时端电压上升速度,所以主开关 S_1 在关断时处于零电压软关断状态.在主开关 S_1 完成关断动作之后, i_{S1} 瞬间突变到零, i_{Sa} 瞬间突变到 $-I_{p0}$,直流电源 U_{d1} 、 U_{d2} 分别向 L_{S1} 和 L_{S2} 转移能量, L_{S1} 和 L_{S2} 处于被充电状态, i_{LS1} 从 I_1-I_0 开始线性增加, i_{LS2} 从 I_1 开始线性增加, i_{Sa} 从 $-I_{p0}$ 开始反向线性减小.在 t_2 时刻, i_{LS1} 等于 I_2-I_0 , i_{LS2} 等于 I_2 , i_{Sa} 等于 $-I_3$,电容 C_1 和 C_2 的两端电压 u_{C1} 、 u_{C2} 分别变化到 $U_{d1}+U_{d2}+U_{Cs}$ 和零时,流程2结束.

(3)流程3($t_2\sim t_3$):在 t_2 时刻,负载电流开始经过与主开关 S_2 的反并联二极管 D_2 续流,直流电源 U_{d1} 、 U_{d2} 分别继续向 L_{S1} 和 L_{S2} 转移能量, i_{LS1} 从 I_2-I_0 开始正向线性增加, i_{LS2} 从 I_2 开始正向线性增加.流过辅助开关 S_a 的电流 i_{Sa} 从 $-I_3$ 开始继续反向线性减小.在 t_3 时刻, i_{LS1} 等于零, i_{LS2} 等于 I_0 , i_{Sa} 变化到零时,流程3结束.

(4)流程4($t_3\sim t_4$):在 t_3 时刻,两个谐振电感 L_{S1} 和 L_{S2}

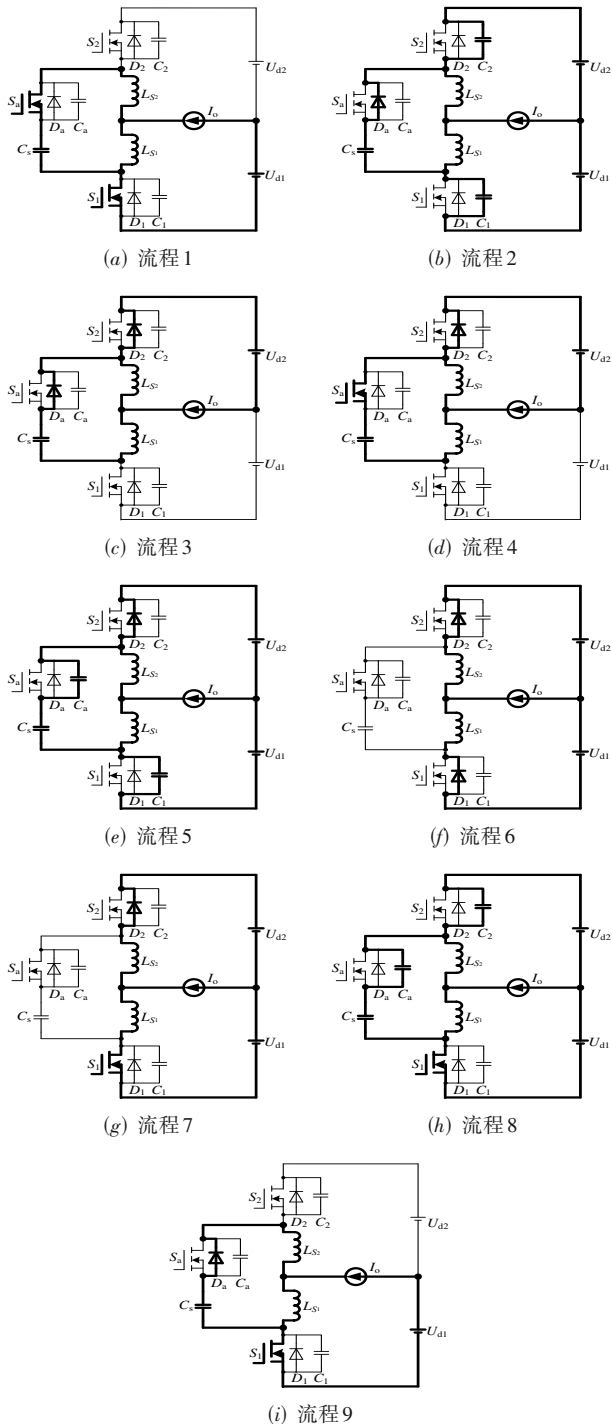


图 4 各工作流程的等效电路图

继续处于正向充电状态, $i_{L_{S1}}$ 从零开始线性增加, $i_{L_{S2}}$ 从 I_0 开始线性增加. 流过辅助开关 S_a 的电流 i_{S_a} 从零开始正向线性增加. 在 t_4 时刻, $i_{L_{S1}}$ 增加到正向最大值 $I_4 - I_0$, $i_{L_{S2}}$ 等于 I_4 , i_{S_a} 等于 $I_4 - I_0$ 时, 流程 4 结束.

(5) 流程 5 ($t_4 \sim t_5$): 在 t_4 时刻, 辅助开关 S_a 的触发脉冲变为低电平, 因为辅助开关 S_a 并联了电容 C_a , 电容 C_a 限制了辅助开关 S_a 发生关断动作时的端电压上升速

度, 所以辅助开关 S_a 在关断时处于零电压软关断状态. 在该流程中, 电感 L_{S1} 和 L_{S2} 与电容 C_1 、 C_a 同时进入谐振状态, 电感 L_{S1} 、 L_{S2} 和电容 C_1 放电, 电容 C_a 被充电. $i_{L_{S1}}$ 从 $I_4 - I_0$ 开始正向减小, $i_{L_{S2}}$ 从 I_4 正向开始减小, u_{C1} 从 $U_{d1} + U_{d2} + U_{C_s}$ 开始正向减小, u_{C_a} 从零开始正向增加, 流过辅助开关的电流 i_{S_a} 从 I_5 开始正向减小. 在 t_5 时刻, $i_{L_{S1}}$ 等于 $I_0 - I_5$, $i_{L_{S2}}$ 等于 I_5 , i_{S1} 突变到 $I_0 - I_5$, u_{C1} 、 u_{C_a} 分别等于零和 $U_{d1} + U_{d2} + U_{C_s}$ 时, 流程 5 结束.

(6) 流程 6 ($t_5 \sim t_6$): 在 t_5 时刻, 主开关 S_1 触发脉冲变成高电平, 主开关 S_1 处于开通状态, 因为主开关 S_1 开通前二极管 D_1 有电流流过, 主开关 S_1 两端电压为零, 所以主开关 S_1 实现了零电压软开通. 在该流程中, 谐振电感 L_{S1} 、 L_{S2} 继续处于放电状态, 当 $i_{L_{S1}}$ 从 $I_5 - I_0$ 变化到 $-I_0$, $i_{L_{S2}}$ 从 I_5 变化到零时, 流程 6 结束.

(7) 流程 7 ($t_6 \sim t_7$): 从 t_6 时刻开始, 反向恢复电流流过二极管 D_2 , 电感 L_{S1} 、 L_{S2} 降低了反向恢复电流上升的速率, 同时利用这个反向恢复电流给电感 L_{S1} 和 L_{S2} 充电, $i_{L_{S1}}$ 和 $i_{L_{S2}}$ 分别从 $-I_0$ 和零开始反向线性增加. 在 t_7 时刻, i_{S1} 等于 $I_1 + I_0$, 流过二极管 D_2 的反向恢复电流变化到零, 二极管 D_2 恢复阻断能力, 自然关断时, 流程 7 结束.

(8) 流程 8 ($t_7 \sim t_8$): 从 t_7 时刻开始, 电感 L_{S1} 、 L_{S2} 与电容 C_2 、 C_a 同时进入谐振状态, 电感 L_{S1} 、 L_{S2} 和电容 C_a 放电, 电容 C_2 被充电. $i_{L_{S1}}$ 从 $I_1 + I_0$ 开始反向减小, $i_{L_{S2}}$ 从 I_1 开始反向减小, u_{C_a} 从 $U_{d1} + U_{d2} + U_{C_s}$ 开始正向减小, u_{C2} 从零开始正向增加, 流过辅助开关的电流 i_{S_a} 从零开始反向增大. 在 t_8 时刻, $i_{L_{S1}}$ 等于 $-I_6 - I_0$, $i_{L_{S2}}$ 等于 $-I_6$, i_{S_a} 突变到 $-I_6$, u_{C_a} 、 u_{C2} 分别变化到零和 $U_{d1} + U_{d2} + U_{C_s}$ 时, 流程 8 结束.

(9) 流程 9 ($t_8 \sim t_9$): 在 t_8 时刻, 辅助开关 S_a 触发脉冲变成高电平, 辅助开关 S_a 处于开通状态, 因为辅助开关 S_a 开通前 D_a 有电流流过, 辅助开关 S_a 两端的电压为零, 所以辅助开关 S_a 实现了零电压软开通. 直流电源 U_{d1} 向电感 L_{S1} 转移能量, L_{S1} 和 L_{S2} 继续处于放电状态, 同时直流电源 U_{d1} 向逆变器输出端转移能量. $i_{L_{S1}}$ 从 $-I_6 - I_0$ 开始反向线性减小, $i_{L_{S2}}$ 和 i_{S_a} 从 $-I_6$ 开始反向线性减小, 在 t_9 时刻, 当 $i_{L_{S1}}$ 等于 $-I_0$, $i_{L_{S2}}$ 和 i_{S_a} 等于零时, 流程 9 结束. 然后电路将再次进入流程 1, 开启下 1 个开关周期的工作.

3 实验验证

根据图 1 所示的主电路, 完成了实验样机的研制. 样机参数如下: 额定输出功率 $P_0 = 1 \text{ kW}$, 负载电阻 $R = 20 \Omega$, 负载电感 $L = 2.5 \text{ mH}$, 最大负载电流 $I_{\text{omax}} = 10 \text{ A}$, 直流电源电压 $U_{d1} + U_{d2} = 300 \text{ V}$, 充当电压源作用的电容 $C_s = 1 \text{ 000 } \mu\text{F}$, 开关频率 $f_c = 20 \text{ kHz}$, 输出频率 $f_0 = 50 \text{ Hz}$, 谐振电感 $L_{S1} = L_{S2} = 5 \mu\text{H}$, 谐振电容 $C_1 = C_2 = C_a = 15 \text{ nF}$, 辅助开关的触发脉冲占空比 $\rho_{S_a} = 0.6$.

图 5(a) 给出了在一个开关周期内, 电容 C_1 、 C_2 两端的

电压 u_{c1} 、 u_{c2} , 流过电感 L_{s2} 的电流 $i_{L_{s2}}$ 的实验波形, 可以看出实验波形与理论工作波形高度吻合. 图 5(b) 和图 5(c) 分别为逆变器在满载和轻载时, u_{s1} 和 i_{s1} 的实验波形. 从图 5(b) 和图 5(c) 能看出主开关 S_1 开通前, u_{s1} 已先降到零, 所以主开关 S_1 实现了零电压软开通; 当主开关 S_1 关断时, u_{s1} 以较低的变化率缓慢上升, 所以主开关 S_1 实现了零电

压软关断动作. 因此在轻载和满载时, 主开关 S_1 均可以完成软切换. 图 5(d) 给出了辅助开关 S_a 进行切换动作时的 u_{s_a} 和 i_{s_a} 的实验波形, 可以看出辅助开关 S_a 开通前, 电压 u_{s_a} 已先为零, 所以 S_a 在开通过程中完成了零电压软开通动作; 当 S_a 关断时, u_{s_a} 从零开始以较低的变化率缓慢增加, 所以 S_a 在关断过程中完成了零电压软关断.

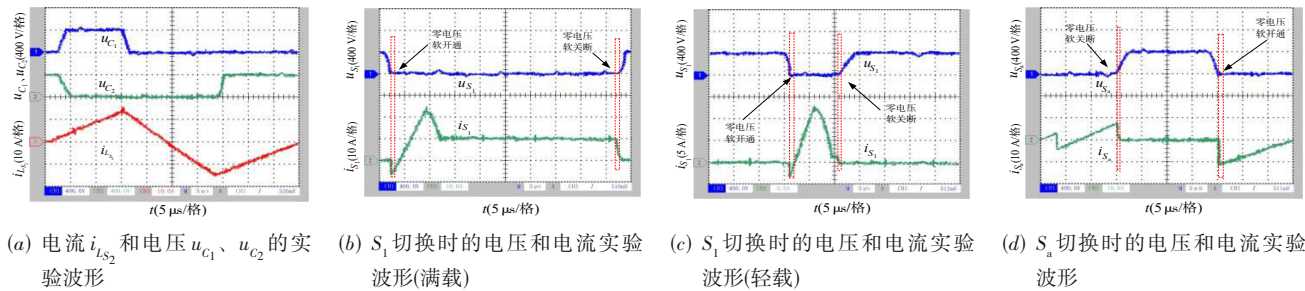


图 5 实验波形

4 结论

设计出了一种新型单相低能耗半桥逆变器, 其拓扑结构的显著优势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, 真正实现了开关零损耗. 经实验验证得到的结论如下: 在轻载和满载时, 逆变器主开关和辅助开关在切换过程中均能完成零电压软切换动作. 本文的研究工作具有重要的参考价值, 为提高单相半桥软开关逆变器的性能和实用性奠定了基础.

参考文献

- [1] 王强, 岳远韶, 王天施, 等. 无源器件辅助换流的单相全桥软开关逆变器[J]. 电子学报, 2018, 46(9): 2295-2298.
WANG Qiang, YUE Yuanshao, WANG Tianshi, et al. Single-phase full-bridge soft-switching inverter with passive device-assisted commutation[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(9): 2295-2298. (in Chinese)
- [2] 王强, 岳远韶, 王天施, 等. 单相全桥三电平节能逆变器[J]. 电子学报, 2018, 46(12): 3068-3072.
WANG Qiang, YUE Yuanshao, WANG Tianshi, et al. A single-phase full-bridge three-level energy-saving inverter [J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(12): 3068-3072. (in Chinese)
- [3] CHU Enhui, ZHANG Xing, HUANG Liang. Research on a novel modulation strategy for double auxiliary resonant commutated pole soft-switching inverter with the shunt dead time[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 6855-6868.
- [4] CHU Enhui, ZHANG Xing, SUN Qiuye, et al. Three-

phase double auxiliary resonant commutated pole inverter topology and analysis of its working principle[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(7): 1536-1545.

- [5] 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.

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



王有政 男, 1997年3月出生于辽宁省本溪市, 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: 18341314116@163.com