

具有软开关功能的新型三相谐振极逆变器

王 强^{1,2}, 曹 睿^{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: 为使三相逆变器实现高效率运行, 本文提出了具有软开关功能的新型三相谐振极逆变器. 当逆变器进入死区状态时, 辅助电路将开始谐振, 桥臂上将要开通的主开关承受的电压可先变为零, 主开关可实现零电压动作, 同时辅助开关可实现零电流动作. 此外, 辅助开关与瞬态电压抑制二极管相连, 在电路处于谐振状态时, 能避免辅助开关承受过高的高频瞬态电压. 本文阐述了电路的工作过程. 实验结果证明开关器件处于软切换状态. 该电路结构能优化逆变器性能.

关键词: 逆变器; 桥臂; 死区; 谐振; 高效率; 软开关; 瞬态电压

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)05-1277-04

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

DOI: 10.12263/DZXB.20191258

Novel Three-Phase Resonant Pole Inverter with Soft-Switching Function

WANG Qiang^{1,2}, CAO Rui^{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: To realize high-efficiency operation, a novel three-phase resonant pole inverter with soft-switching function is proposed. When the inverter is in dead-zone state, the auxiliary circuit will start to resonate. The voltage across the main switch on the bridge arm which will be turned on can become zero in advance, so it can obtain zero-voltage soft switching, and the auxiliary switch can also obtain zero-current soft switching. In addition, the auxiliary switch is connected with the transient voltage suppression diode, which can not make the auxiliary switch bear excessive high frequency transient voltage when the circuit is in resonant state. The working process is illustrated. The experimental results show that switching devices is in the state of soft switching. The circuit structure can optimize the performance of the inverter.

Key words: inverter; bridge arm; dead-zone; resonance; high-efficiency; soft-switching; transient-voltage

1 引言

桥臂上的辅助电路参与谐振极逆变器的换流过程时, 逆变器的直流母线电压仍然保持稳态, 直流电压利用率不会受到影响. 因此, 谐振极逆变器的实用价值较高. 但是已设计出的各种相关拓扑结构依然需要优化. 文献[1~4]设计的电路结构中, 辅助开关承受的稳态电压都不低于直流电源电压, 同时还缺少对辅助开关的保护, 都没有在辅助电路中设置瞬态电压抑制二极管来避免谐振过程中出现的电压尖峰破坏辅助开关.

为优化谐振极逆变器的拓扑结构, 提高其实用性,

本文设计出了具有软开关功能的新型逆变器, 其优势是辅助开关器件承受的稳态电压约为直流电源电压的一半, 而且辅助电路里包含瞬态电压抑制二极管, 使辅助开关避免在谐振过程承受过高的电压尖峰, 能有效保护辅助开关不被损坏. 本文将给出电路的工作流程说明, 利用实验结果来验证该逆变器的工作性能.

2 拓扑结构和工作流程

2.1 拓扑结构和软切换类型

以图1所示的a相桥臂为例, 其包括谐振电容 C_{ra} , 谐振电感 L_{ra} , 两个辅助二极管 D_7 、 D_8 和辅助开关 S_{1a} 、 S_{2a} .

与反并联二极管 D_{1a} 、 D_{2a} ，其中 D_7 和 D_8 是瞬态电压抑制二极管，用来避免谐振过程中出现的电压尖峰破坏辅助开关器件。另外， C_1 和 C_2 为分压电容，用来均分直流电源电压。主开关 $S_1 \sim S_6$ 在开通时处于零电压软开通状态，在关断时处于零电压软关断状态；辅助开关 $S_{1a} \sim S_{6a}$ 在开通时处于零电流软开通状态，在关断时取得了零电流软关断。

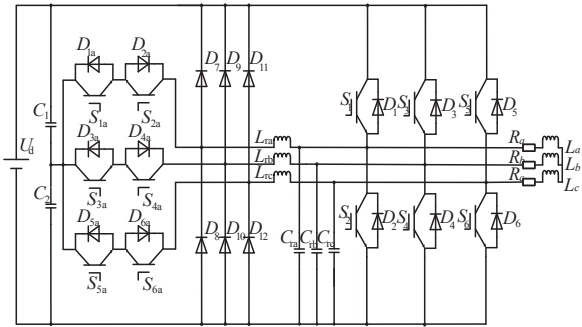


图1 三相谐振极逆变器主电路

2.2 电路工作过程

在工作过程阐述中认为电路所含器件都处在理想状态，负载可用恒流源代替， C_1 与 C_2 可用恒压源代替。本文将主要阐述 a 相桥臂的电路工作过程，图2为其等效电路，参考正方向如箭头所示。图3为相关的理论工作波形。图4为各流程电流路径。

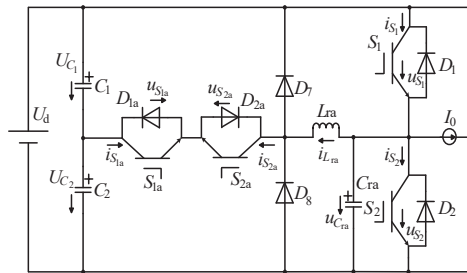


图2 三相谐振极逆变器的单相等效电路

流程1 ($t \sim t_0$): C_{ra} 两端电压 $u_{C_{ra}}$ 等于 U_d ，流过 L_{ra} 的电流 $i_{L_{ra}}$ 等于 0， C_1 和 C_2 两端电压 u_{C_1} 和 u_{C_2} 分别等于 U_{C_1} 和 U_{C_2} ，流过 S_1 的电流 i_{S_1} 等于负载电流 I_0 ，电路处于稳态。

流程2 ($t_0 \sim t_1$): 在 t_0 时刻， L_{ra} 阻碍了 S_{2a} 开通时的电流 $i_{S_{2a}}$ 快速增大， S_{2a} 完成了零电流软开通，然后 L_{ra} 吸收电能， $i_{L_{ra}}$ 开始以恒定变化率增大。在 t_1 时刻， $i_{L_{ra}}$ 等于 I_{b1} ，流程2结束。

流程3 ($t_1 \sim t_2$): 在 t_1 时刻， C_{ra} 阻碍了 S_1 关断时的端电压快速增大， S_1 完成了零电压软关断，然后 C_{ra} 和 L_{ra} 进入谐振状态， $i_{L_{ra}}$ 先正向增大再减小，在 $u_{C_{ra}}$ 变化到 U_{C_2} 时， $i_{L_{ra}}$ 到达正向最大值 $I_{L_{ra}max1}$ ，在 $u_{C_{ra}}$ 变化到零的 t_2 时刻， $i_{L_{ra}}$ 减

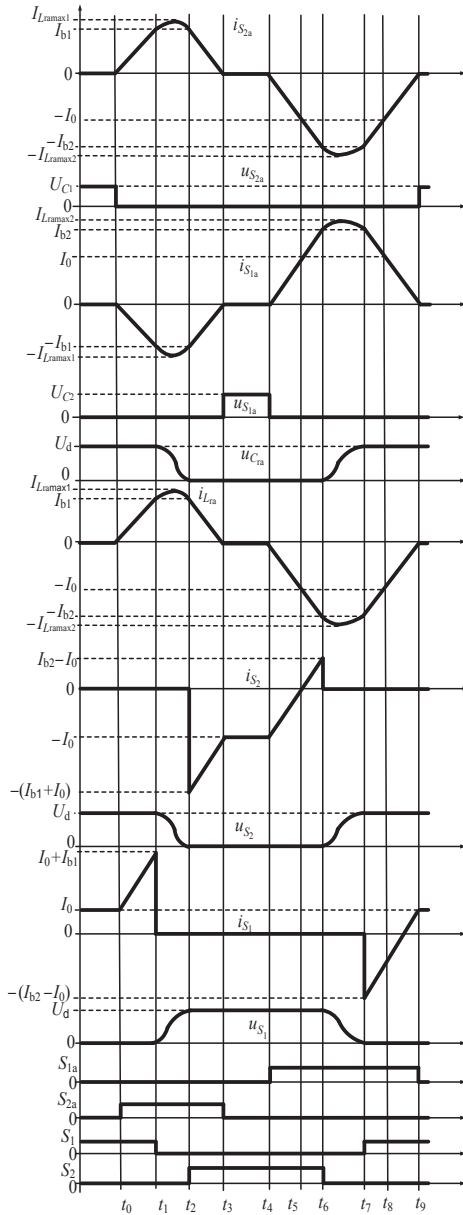


图3 谐振换流期间的理论工作波形

小到 I_{b1} ，流程3结束。

流程4 ($t_2 \sim t_3$): 在 t_2 时刻， S_2 端电压已经先降到零，所以 S_2 在开通时处于零电压软开通状态， C_{ra} 和 L_{ra} 谐振结束。在该流程中， L_{ra} 释放电能， $i_{L_{ra}}$ 以恒定变化率减小。在 t_3 时刻， $i_{L_{ra}}$ 减小为零，流程4结束。

流程5 ($t_3 \sim t_4$): 在 t_3 时刻，流过 S_{2a} 的电流 $i_{S_{2a}}$ 先降到零， S_{2a} 在关断时处于零电流软关断状态。在 S_{2a} 关断之后， I_0 流过 D_2 ，电路工作于稳定状态。

流程6 ($t_4 \sim t_5$): 在 t_4 时刻， L_{ra} 阻碍了 S_{1a} 开通时的电流 $i_{S_{1a}}$ 快速增大， S_{1a} 完成了零电流软开通，然后 L_{ra} 吸收电能， $i_{L_{ra}}$ 从零开始以恒定变化率反向增大。在 t_5 时刻， $i_{L_{ra}}$

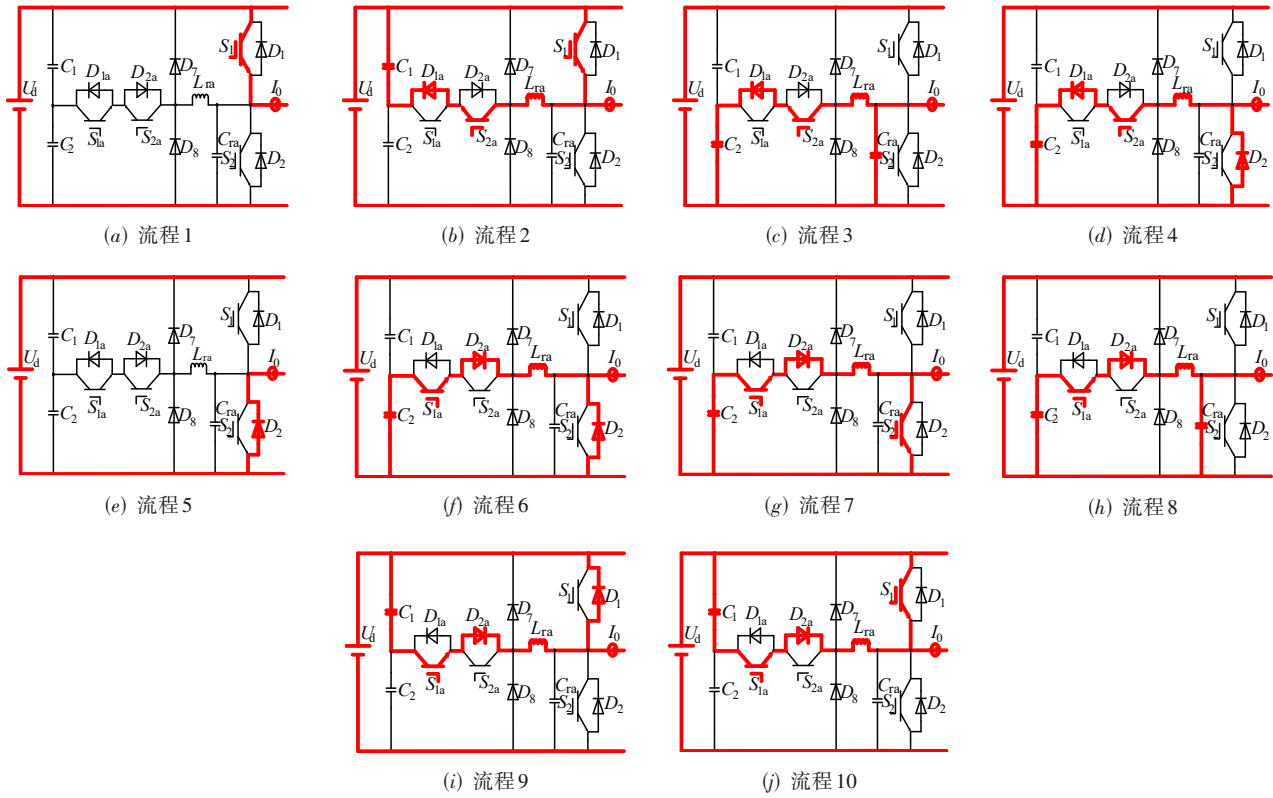


图 4 各工作流程的等效电路图

反向增大到 I_0 , 流程 6 结束.

流程 7 ($t_5 \sim t_6$): 在该流程中, L_{ra} 继续吸收电能, $i_{L_{ra}}$ 从 $-I_0$ 开始继续反向增大. 在 t_6 时刻, $i_{L_{ra}}$ 变化到 $-I_{b2}$, 流程 7 结束.

流程 8 ($t_6 \sim t_7$): 在 t_6 时刻, C_{ra} 阻碍了 S_2 关断时的端电压快速增大, S_2 完成了零电压软关断. 然后 C_{ra} 和 L_{ra} 进入谐振状态, $i_{L_{ra}}$ 处于反向增大再反向减小的过程, $i_{L_{ra}}$ 从 $-I_{b2}$ 开始反向增大到 $-I_{L_{ra}max2}$ 再反向减小到 $-I_{b2}$. 在 $u_{C_{ra}}$ 变成 U_{c2} 时, $i_{L_{ra}}$ 达到 $-I_{L_{ra}max2}$. 在 $u_{C_{ra}}$ 变成 U_d 的 t_7 时刻, $i_{L_{ra}}$ 达到 $-I_{b2}$, 流程 8 结束.

流程 9 ($t_7 \sim t_8$): 在 t_7 时刻, S_1 端电压先降到零, S_1 在开通时处于零电压软开通状态, 同时 D_1 导通, C_{ra} 和 L_{ra} 谐振结束. 在该流程中 $i_{L_{ra}}$ 处于以恒定变化率反向减小的过程. 在 t_8 时刻, $i_{L_{ra}}$ 变为 $-I_0$, 流程 9 结束.

流程 10 ($t_8 \sim t_9$): 此流程中, L_{ra} 吸收电能, $i_{L_{ra}}$ 继续处于以恒定变化率反向减小的过程. 在 $i_{L_{ra}}$ 变化为零的 t_9 时刻, 流程 10 结束. 在 t_9 时刻, 流过 S_{1a} 的电流先降到零, S_{1a} 在关断时处于零电流软关断状态.

至此, 电路工作过程阐述完毕, 然后电路将再进入流程 1, 重复上述工作过程.

3 实验验证

样机参数如下: $P_0=3 \text{ kW}$, $R_a=R_b=R_c=6 \ \Omega$, $L_a=L_b=L_c=0.8 \text{ mH}$, $U_d=220 \text{ V}$, $L_{ra}=L_{rb}=L_{rc}=20 \ \mu\text{H}$, $C_{ra}=C_{rb}=C_{rc}=0.039 \ \mu\text{F}$, S_{1a}, S_{3a} 和 S_{5a} 的触发脉冲占空比为 $\rho_{S_{1a}}=\rho_{S_{3a}}=\rho_{S_{5a}}=0.31$, S_{2a}, S_{6a} 和 S_{4a} 的触发脉冲占空比为 $\rho_{S_{2a}}=\rho_{S_{6a}}=\rho_{S_{4a}}=0.171$, 最大负载电流 $I_{0max}=18 \text{ A}$, 开关频率 $f_c=20 \text{ kHz}$, 输出频率 $f_0=50 \text{ Hz}$, 死区时间 $\Delta=2.8 \ \mu\text{s}$.

图 5(a) 和图 5(b) 分别给出了逆变器工作于满载和轻载状态下, S_1 完成开通和关断时的 u_{S_1} 和 i_{S_1} 的实验波形, 实验波形显现出 S_1 关断后的 u_{S_1} 变化相对缓慢, S_1 处在零电压软关断切换; 在 S_1 开通后, i_{S_1} 从零开始变化前, u_{S_1} 已先变为零, S_1 处在零电压软开通切换. 图 5(c) 和图 5(d) 分别给出了 S_{1a} 和 S_{2a} 完成开通和关断时的端电压 $u_{S_{1a}}, u_{S_{2a}}$ 和流过的电流 $i_{S_{1a}}, i_{S_{2a}}$ 的实验波形, 实验波形显现出 S_{1a} 和 S_{2a} 开通后的 $i_{S_{1a}}$ 和 $i_{S_{2a}}$ 变化相对缓慢, S_{1a} 和 S_{2a} 处在零电流软开通切换; 在 S_{1a} 和 S_{2a} 关断后, $u_{S_{1a}}$ 和 $u_{S_{2a}}$ 从零开始变化前, $i_{S_{1a}}$ 和 $i_{S_{2a}}$ 已先变为零, S_{1a} 和 S_{2a} 处在零电流软关断切换.

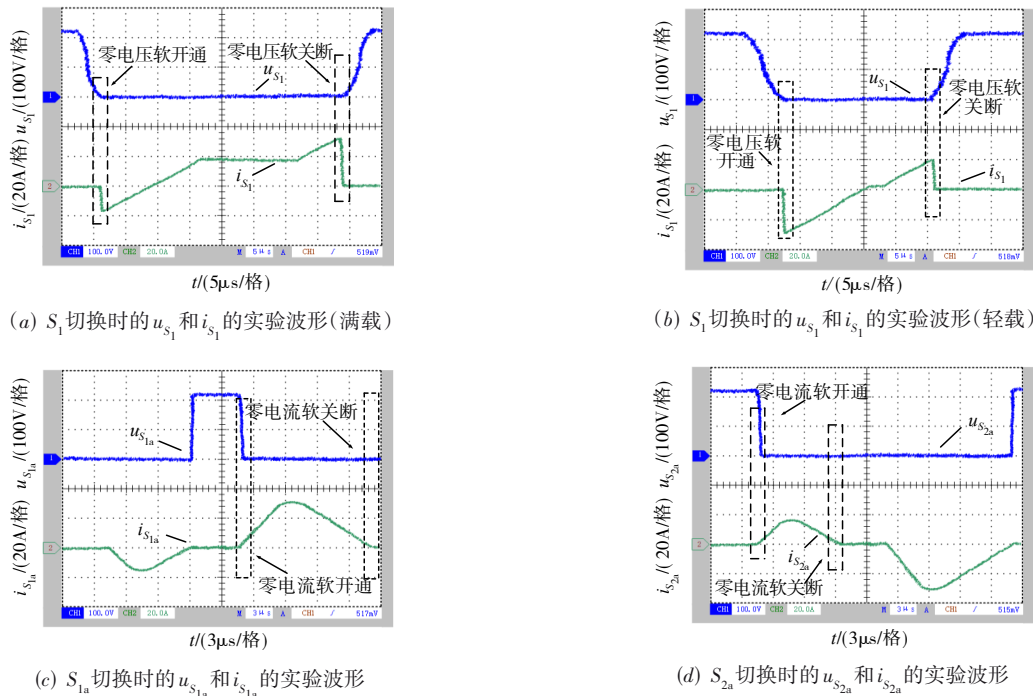


图5 实验波形

4 结论

提出了具有软开关功能的新型三相谐振极逆变器,其突出优势是辅助开关承受稳态电压较低,电路设置了能保护辅助开关在谐振过程不被尖峰电压击穿的瞬态电压抑制二极管.通过对实验波形的分析,证明了主开关动作时处在零电压软切换,辅助开关动作时处在零电流软切换.

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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)
- [3] 王强, 曹睿, 王天施, 等. 高效率三相谐振极逆变器[J]. 电子学报, 2021, 49(6): 1224-1227.
WANG Qiang, CAO Rui, WANG Tian-shi, et al. High-efficiency three-phase resonant pole inverter[J]. Acta Elec-

tronica Sinica, 2021, 49(6): 1224-1227. (in Chinese)

- [4] 褚恩辉, 毋劲漾. 辅助谐振极逆变器缓冲回路能耗最小化改进控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 90-98, 190.
CHU Enhui, WU Mengyang. A modified control strategy of loss minimization in the snubber circuit for auxiliary resonant commutated pole inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 90-98, 190. (in Chinese)

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



曹睿 男, 1997年4月出生于辽宁省大连市, 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: 302955678@qq.com