

电流型零电压开关节能整流器

王 强,岳远韶,王天施,刘晓琴

(辽宁石油化工大学信息与控制工程学院,辽宁抚顺 113001)

摘 要: 为解决电流型脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)整流器在高开关频率下硬切换时的开关损耗问题,提出了一种电流型零电压开关节能整流器,其辅助谐振电路位于直流环节,且与直流母线并联,只有1个辅助开关.在换流过程中,主开关能实现零电压切换,辅助开关能实现零电流切换,而且当整流器采用多电平 PWM 控制策略时,辅助电路在每个开关周期只需工作1次.分析了谐振换流过程,仿真结果表明特征仿真波形符合理论分析,开关器件切换时处于软开关状态,整流器能平稳运行.该电流型零电压开关节能整流器可以在高开关频率和大功率的应用场合实现高效率运行.

关键词: 整流器; 辅助谐振电路; 零电压开关; 节能

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)06-1515-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.06.035

Current-Source Zero-Voltage Switching Energy-Saving Rectifier

WANG Qiang, YUE Yuan-shao, WANG Tian-shi, LIU Xiao-qin

(College of Information and Control Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun, Liaoning 113001, China)

Abstract: A resonant DC link current-source zero-voltage switching PWM rectifier is put forward to solve the switching loss problem under high switching frequency. The auxiliary circuit is in parallel with the DC bus and is added in the DC link. Only one auxiliary switch set in its auxiliary circuit. In the process of commutation, zero-voltage switching can be achieved in the main switch and zero-current switching can be achieved in the auxiliary switch. Furthermore, when multilevel PWM control strategy is adopted by the rectifier, the auxiliary circuit only needs to work for one time in each switching period. This paper analyzed the resonant commutation process. The simulation results show that the characteristics of the simulation waveforms are consistent with the theoretical analysis, the switches can realize soft-switching and the rectifier can run stably. The current-source energy-saving rectifier with zero-voltage switching can be operated under high switching frequency and high power applications.

Key words: rectifier; auxiliary resonant circuit; zero-voltage switching; energy-saving

1 引言

近些年,电流型 PWM 整流器的电感储能效率问题因为高温超导技术的发展和得到明显改善^[1],而且电流型 PWM 整流器自身具有过流抑制能力和四象限运行能力等优点^[2],因此电流型 PWM 整流器的研究已得到了研究人员越来越多的关注.

为解决电流型 PWM 整流器运行于硬开关时的功率损耗问题,研究人员提出了谐振直流环节 PWM 软开关整流器拓扑结构,文献[3,4]提出的谐振直流环节电流型 PWM 整流器的拓扑结构能将整流器桥臂上的电

流周期性换流到辅助电路所在支路,这样桥臂上的开关器件能实现零电流开关,而且没有辅助器件串接在直流母线上,降低了辅助电路的通态损耗,但是其辅助开关器件数多于1个,导致控制复杂和高硬件成本,而且采用有利于提高功率因数的多电平 PWM 控制策略时,在每个开关周期内,辅助谐振电路参与换流次数多不利于减小辅助电路损耗.

本文提出了一种电流型零电压开关节能整流器的拓扑结构,相比于同类型的电流型 PWM 软开关整流器拓扑结构,其具有以下显著特点:(1)辅助电路只含有1个辅助开关,而且辅助开关的开关频率(辅助电路触发频率)

收稿日期:2017-03-16;修回日期:2017-08-30;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)

和触发脉冲占空比可以设为固定值,有利于简化辅助电路控制和降低硬件成本;(2)电流型整流器桥臂上的主开关并联了缓冲电容,主开关实现了零电压切换,辅助开关实现了零电流切换;(3)整流器采用三电平 PWM 控制策略时,每个开关周期内仅在输出电压从零切换到最大值的过程中需要辅助电路参与换流,辅助电路在每个开关周期只参与 1 次换流过程,可以最大程度地减小辅助电路损耗.文中分析了辅助谐振电路的工作流程,通过仿真验证了所提出的电流型软开关整流器的性能.

2 电路结构及工作过程

2.1 电路结构

提出的新型电流型零电压开关整流器的主电路如图 1 所示,与传统的硬开关电流型整流器主电路不同之处是在整流器桥臂和直流滤波电感之间增加了辅助谐振电路,而且电容值为 C_s 的缓冲电容并联于整流器主开关两端.辅助开关 S_a ,谐振电感 L_r ,谐振电容 C_r ,辅助二极管 D_a 和 D_b 组成了辅助谐振电路.当整流器桥臂上的主开关需要开通时,利用辅助谐振电路使整流器的输出电压 u_0 能超过整流器输入线电压的瞬时值,这样就可以使整流器桥臂上处于关断状态的各开关器件并联的缓冲电容承受正极性电压,即开关器件承受与将流过的电流方向相反的电压.确保开关器件流过电流前,其并联的缓冲电容的电压能先降到零,以实现零电压开通.因为各主开关都并联了缓冲电容,所以可以自然实现零电压关断.在分析电路时,作以下假设^[5-8]:(1)各器件都是理想器件;(2)因为直流滤波电感值远大于谐振电感值,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.图 1 中的箭头指出了电路中各物理量的参考正方向.

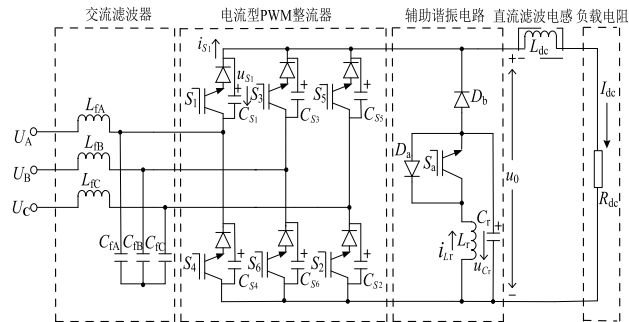


图1 电流型零电压开关节能整流器的主电路图

2.2 工作过程

以整流器的 A 相输入电压最大, B 相输入电压最小的控制时区为例来分析一个开关周期内的谐振电路的 6 个工作阶段,输出电压从最小值切换到最大值的过程是从 S_1 和 S_4 导通切换到 S_1 和 S_6 导通的换流过程,该过程需要辅助谐振电路参与换流.图 2 表示谐振换流期

间的理论波形图,图 3 表示各阶段的等效电路图.

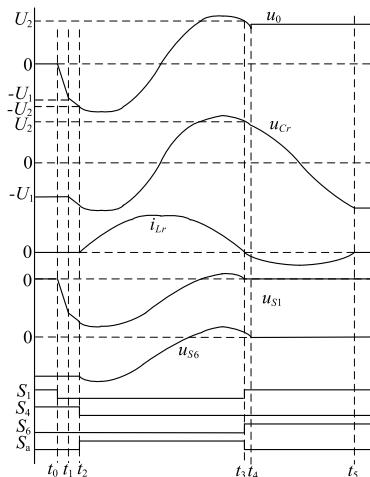


图2 谐振换流期间的理论工作波形

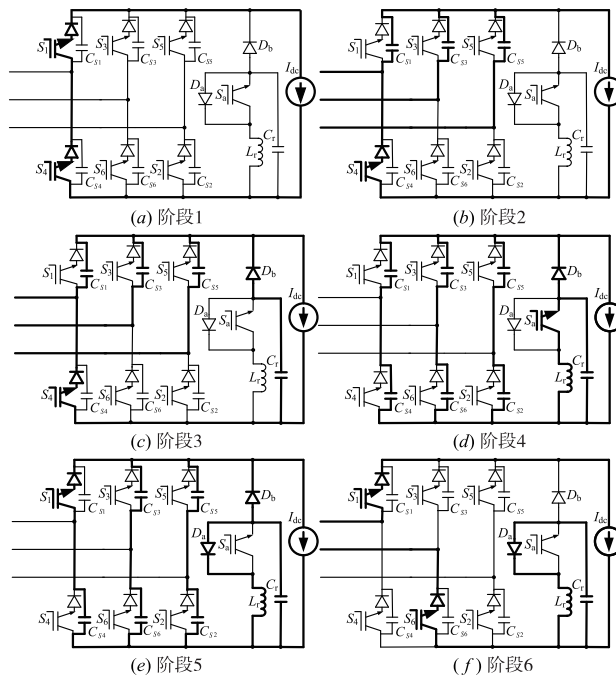


图3 各个工作阶段下的等效电路

工作过程如下:

(1)阶段 1($t \sim t_0$): S_1 和 S_4 导通,负载电流通过 S_1 和 S_4 实现续流,交流电源不向整流器负载供电,整流器输出电压为零,电路处于稳态.

(2)阶段 2($t_0 \sim t_1$): 在 t_0 时刻,关断 S_1 ,因为 S_1 并联了 C_{S1} , C_{S1} 限制了 S_1 关断动作时的端电压上升速度, S_1 在关断时处于零电压软关断状态. S_1 完成关断动作之后,电流同时流过 C_{S1} , C_{S3} 和 C_{S5} , 整流器的输出电压 u_0 开始反向线性增加. 在 t_1 时刻,当 u_0 反向增加到 C_r 的初始电压值 U_1 时,电流开始流过 D_b ,阶段 2 结束.

(3)阶段 3($t_1 \sim t_2$): 在 t_1 时刻, D_b 导通,电流开始

流过 D_b 和 C_r , C_r 的端电压 u_{Cr} 与整流器输出电压 u_0 相等, u_0 继续反向线性增加, 但是因为电路中的等效电容值变大, u_0 的反向增加速度降低. 在 t_2 时刻, 当 u_0 反向增加到谐振电容的电压阈值 U_2 时, 阶段 3 结束,

(4) 阶段 4 ($t_2 \sim t_3$): 在 t_2 时刻, 关断 S_4 , 同时开通 S_a , C_{sa} 限制了 S_4 关断瞬间的电压变化率, L_r 限制了 S_a 发生开通动作时的电流上升速度, 因此 S_4 在关断时处于零电压软关断状态, S_a 在开通时处于零电流软开通状态. 在 S_a 和 S_4 完成切换动作之后, 电流将同时流过 6 个缓冲电容, 电路中的等效电容 C_{eq3} 等于 $3C_s/2 + C_r$, C_{eq3} 与 L_r 进入谐振状态, 在 t_3 时刻, 当 u_{Cr} 和 u_0 减小到 U_2 , u_{S1} 减小到零, u_{S6} 大于零, i_{Lr} 减小到零时, 同时开通 S_1 和 S_6 , 并关断 S_a , S_1 和 S_6 实现了零电压开通, S_a 实现了零电流关断, 阶段 4 结束.

(5) 阶段 5 ($t_3 \sim t_4$): 在 t_3 时刻, 电流开始流过 S_1 , 电路中的等效电容 C_{eq4} 等于 $2C_s + C_r$, C_{eq4} 与 L_r 仍然处于谐振状态, 在 t_4 时刻, u_{S6} 减小到零时, 阶段 5 结束.

(6) 阶段 6 ($t_4 \sim t_5$): 从 t_4 时刻开始, C_r 与 L_r 仍然处

于谐振状态, 在 t_5 时刻, i_{Lr} 在反方向上变化达到零, D_a 截止, C_r 与 L_r 谐振结束, 阶段 6 结束. 至此, 从 S_1 和 S_4 导通切换到 S_1 和 S_6 导通的换流过程结束, 接下来电路将进入到 S_1 和 S_6 导通的稳态运行状态.

3 仿真结果

按照图 1 所示主电路, 搭建了仿真模型, 进行了仿真验证, 采用三电平 PWM 控制方法, 仿真参数如下: 额定输出功率 $P_0 = 10\text{kW}$, 交流滤波电感 $L_f = 5\text{mH}$, 交流滤波电容 $C_f = 50\mu\text{F}$, 直流滤波电感 $L_{dc} = 10\text{mH}$, 额定负载电阻 $R_{dc} = 25\Omega$, 整流器交流侧输入线电压最大瞬时值 $U_{imax} = 537\text{V}$, 谐振电容的初始稳态电压值 $U_1 = 500\text{V}$, 整流器交流侧输入线电压有效值 $U_{line} = 380\text{V}$, 整流器直流侧输出额定直流电压 $U_{dc} = 500\text{V}$, 额定负载电流 $I_{dmax} = 20\text{A}$, 允许的最低负载电流 $I_{dmin} = 3\text{A}$, 辅助开关触发脉冲的占空比 $\rho_{sa} = 0.1$, 开关频率 $f_c = 10\text{kHz}$, 谐振电感 $L_r = 30\mu\text{H}$, 缓冲电容 $C_s = 39\text{nF}$, 谐振电容 $C_r = 0.15\mu\text{F}$.

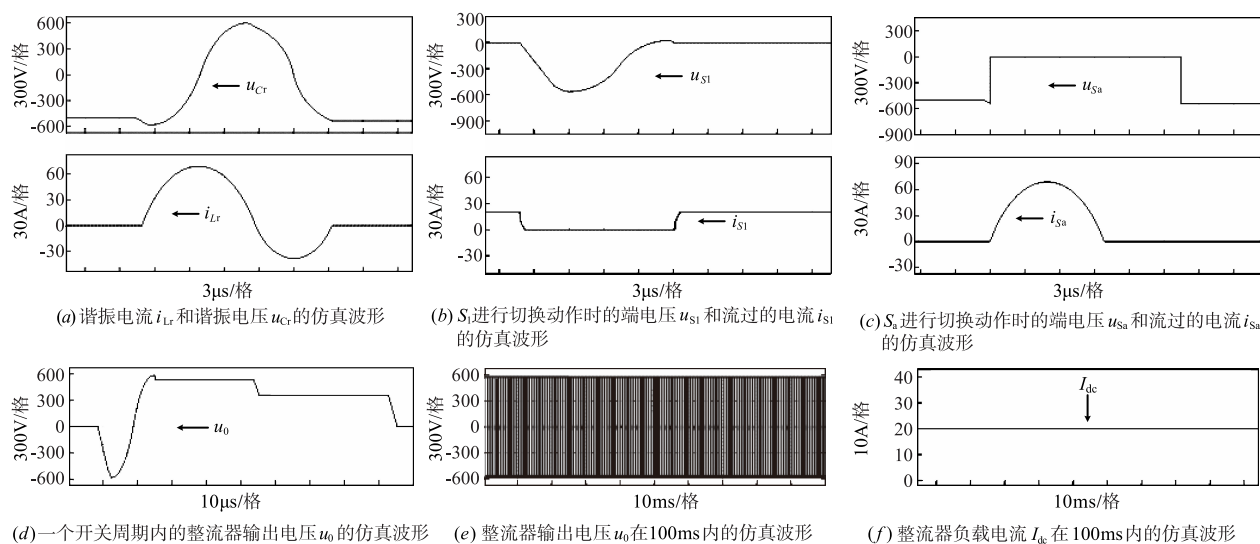


图 4 仿真波形

仿真波形如图 4 所示, 仿真波形中的电压和电流取的正方向与图 1 中的标注一致. 图 4(a) 给出了在额定负载下, 在一个开关周期内, 流过谐振电感 L_r 的电流 i_{Lr} 和谐振电容 C_r 的端电压 u_{Cr} 的仿真波形, 可以看出仿真波形与图 2 所示的理论工作波形基本相符. 图 4(b) 给出了整流器上桥臂主开关 S_1 进行切换动作时的端电压 u_{S1} 和流过的电流 i_{S1} 的仿真波形, 从仿真波形可以看出 S_1 关断时, u_{S1} 以较低变化率约 $170\text{V}/\mu\text{s}$ 反向增大, 所以实现了 S_1 的零电压软关断, 由仿真波形可知在关断瞬间, 如果开关器件的端电压从零开始以相对较低的变化率增大, 即端电压上升率受到了限制使关断损耗降低, 开关器件就实现了零电压关断. 从仿真波形还

可以看出 i_{S1} 从零增大之前, u_{S1} 已经变化到零, 所以实现了 S_1 的零电压开通. 图 4(c) 给出了辅助开关 S_a 进行切换动作时的端电压 u_{Sa} 和流过的电流 i_{Sa} 的仿真波形, 可以看出 S_a 开通时, i_{Sa} 以较低的变化率正向增大, 实现了 S_a 的零电流软开通; 还可以看出 u_{Sa} 瞬间反向增大之前, i_{Sa} 已经等于零, 实现了 S_a 的零电流关断. 图 4(d) 给出了 1 个开关周期内的整流器输出电压 u_0 的仿真波形, 整流器采用三电平 PWM 控制, 从波形可以看出 u_0 在 3 个不同稳态值之间切换, 波形只在从最小稳态值向最大稳态值切换过程中出现了 1 次动态变化, 这是辅助谐振电路参与到换流过程造成的, 也说明了在 1 个开关周期内辅助电路仅参与换流过程 1 次, 辅助谐

振电路损耗得到了有效限制. 图 4(e)与图 4(f)分别给出了该软开关整流器在 100ms 内的输出电压 u_0 和负载电流 I_{dc} 的仿真波形,可以看出输出电压 u_0 和负载电流 I_{dc} 变化平稳,软开关整流器处于平稳运行状态,增设的辅助电路没有对整流器的平稳运行产生不利影响.

4 结论

设计出了一种电流型零电压开关节能整流器,显著特点是辅助电路只有 1 个辅助开关,辅助谐振电路在每个开关周期只需工作 1 次,这样既简化控制,又减小了辅助谐振电路损耗,有利于改善效率. 经仿真验证得到结论如下:(1)整流器的主开关可以实现零电压开关,辅助开关也可以实现零电流开关;(2)在每个开关周期内,只在输出电压从零切换到最大稳态值时,辅助谐振电路参与换流过程;(3)辅助谐振电路的工作对整流器无不良影响,整流器可以平稳运行. 本文的研究成果对于提高谐振直流环节电流型软开关整流器的实用性具有重要的参考价值,也为将谐振直流环节电流型软开关整流器推广和应用到 100kW 以上的大功率不间断电源的前端整流奠定了基础.

参考文献

- [1] 易永仙. 带容性负载的三相电流源型 PWM 整流器及其控制策略研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013. 45-50.
Yi Yongxian. Study on the three phase current-source PWM rectifier with voltage-source load and its control strategy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2013. 45-50. (in Chinese)
- [2] 张兴,张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2013. 85-90.
Zhang Xing,Zhang Chongwei. PWM rectifier and its Control[M]. Beijing:China Machine Press,2013. 85-90. (in Chinese)
- [3] Han B M,Moon S I. Static reactive-power compensator using soft-switching current-source inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2001,48(6): 1158-1165.
- [4] 陶礼学,姚钢,陈陈. 一种新型 PWM 软开关整流器的仿真[J]. 电力系统及其自动化学报,2006,18(6):64-69.
Tao Lixue,Yao Gang,Chen chen. Simulation on a novel PWM softswitch rectifier[J]. Proceedings of the CSU-EP-SA,2006,18(6):64-69. (in Chinese)
- [5] 王强,唐朝垠,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,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)

- [6] 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 Electronic Sinica,2013,41(11):2317-2320. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 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)

作者简介



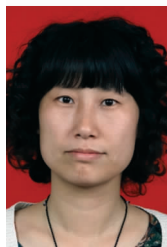
王 强(通讯作者) 男,1981 年 10 月出生于辽宁省沈阳市,博士,现为辽宁石油化工大学信息与控制工程学院副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为软开关变换器的电路拓扑及控制.
E-mail: master2007@126.com



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