

具有并联谐振直流环节的软开关电压源逆变器

王 强^{1,2}, 邢 岩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. 南京航空航天大学新能源发电与电能变换重点实验室, 江苏南京 210016)

摘 要: 为提高逆变器的变换效率, 提出了一种具有并联谐振直流环节的新型软开关电压源逆变器的拓扑结构. 通过传统硬开关逆变器的直流环节添加辅助谐振单元, 使直流母线电压周期性地归零, 实现逆变桥开关器件在零电压条件下完成切换, 而且辅助开关器件也可以实现零电压开关或零电流开关. 此外, 电路中避免了使用大电容, 没有中性点电位的变化问题. 文中对其工作原理进行分析, 给出不同工作模式下的等效电路图. 制作一个 5 kW 的实验样机, 实验结果表明该并联谐振直流环节软开关逆变器的主开关实现了零电压开关, 在额定输出功率下, 相比于硬开关逆变器, 效率提高了 3%.

关键词: 零电压开关; 直流环节; 并联谐振; 逆变器

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 11-2317-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.11.033

Soft Switching Voltage Source Inverter with Parallel Resonant DC Link

WANG Qiang^{1,2}, XING Yan²

(1. School of Information and Control Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun, Liaoning 113001, China; 2. Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: This paper proposes a novel soft-switching voltage source inverter with parallel resonant DC link to improve efficiency of inverter. We added auxiliary resonant unit to DC link of conventional inverter to make DC-bus voltage decreased to zero periodically, which realized zero-voltage operation of all switching devices in inverter. Furthermore, we also operated auxiliary switches under zero voltage switching or zero current switching. In addition, we avoided the bulk capacitor in the circuit and there was no center tap potential variation problem. We analyzed the operation principle and presented the equivalent circuits at different operation modes. We had built a 5kW laboratory prototype. Experimental results show that we can operate main switching devices under zero voltage and enhance the efficiency by 3% under rating power, compared with hard-switching inverter.

Key words: zero voltage switching; DC link; parallel resonant; inverter

1 引言

软开关技术在逆变器中的应用大大降低了开关损耗, 使开关频率有了大幅度提高. 高频逆变器不仅具有更好的输出波形和更小的设备尺寸, 而且当开关频率达到 18kHz 以上时, 可实现无噪声传动系统. 具有谐振直流环节的软开关逆变器的研究一直是电力电子领域最活跃的分支之一, 从早期的谐振直流环节逆变器^[1]、有源箝位谐振直流环节逆变器^[2], 发展到各种并联谐振直流环节逆变器^[3-7]. 并联谐振直流环节逆变器具有电感元件在并联支路, 可以减少电感损耗和电路具有良好的脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 应用能力等优点, 是目前谐振直流环节逆变器拓扑研究发展的主流.

本文提出了一种具有并联谐振直流环节的新型软开关电压源逆变器的拓扑结构, 文中对其工作原理进行了分析, 给出了不同工作模式下的等效电路图, 制作了一个功率 5kW 的实验样机, 通过实验来验证本文提出的新型拓扑结构的有效性.

2 电路结构及工作原理

2.1 电路结构

新回路的拓扑结构如图 1 所示, 由直流电源, 辅助谐振电路和 PWM 逆变器电路组成. 辅助谐振电路包括谐振电容 C_a , 谐振电感 L_r , 辅助开关器件 S_{c1} 、 S_{a1} 、 S_{a2} , 及其反并联二极管 D_{c1} 、 D_{a1} 、 D_{a2} . PWM 逆变器桥臂上的各开关器件都并联缓冲电容 C_s , 辅助谐振电路为 PWM

逆变器开关器件提供零电压开关条件.三相逆变桥的开关器件在直流母线零电压凹槽期间关断或开通,功率器件开关时无电压和电流的重叠,从而降低了开关损耗.

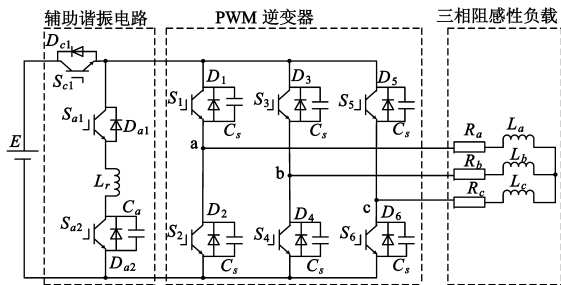


图1 三相谐振直流环节逆变器主电路

为简化分析,做如下假设:(1)器件均为理想工作状态;(2)负载电感远大于谐振电感,逆变桥开关状态过渡瞬间的负载电流可以认为是恒流源 I_0 ,负载电流方向保持不变,其数值取决于各相电流的瞬时值及逆变桥6个开关器件的开关状态;(3)逆变器的6个主开关器件等效为 S_{inv} ,主开关器件反并联的续流二极管等效为 D_{inv} ,当 S_{inv} 导通时,表示桥臂瞬间短路;(4)逆变器的6个缓冲电容 C_s 等效为 C_r ,取 $C_r = 3C_s$,这是因为逆变器各桥臂上下任意一方的开关器件接通时,都使其并联的电容 C_s 短路,正常工作时3个桥臂上的电容相当于3个电容并联.新型的拓扑结构可等效为如图2所示的电路.负荷电流 I_0 以图2所示方向流过,各部分的电流电压都以图2所示的方向为正.

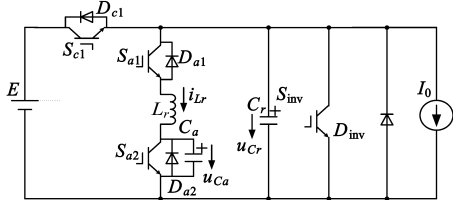


图2 逆变器的等效电路

2.2 工作原理

本电路在一个开关周期内可以分为8个工作模式,电路的特征工作波形如图3所示,各工作模式的等效电路如图4所示.在图3中,等效开关器件 S_{inv} 导通期间表示桥臂处于短路状态.

(1)模式1($t \sim t_0$):初始状态,电源通过 S_{c1} 向负载供电, S_{c1} 和 S_{a2} 处于开通状态,电路工作在稳态.

(2)模式2($t_0 \sim t_1$):在 t_0 时刻,开通 S_{a1} ,在 L_r 的作用下,降低了流过 S_{a1} 的电流的上升率,所以 S_{a1} 实现了零电流开通. S_{a1} 开通后, L_r 承受的电压值为 E , L_r 被充电,流过 L_r 的电流 i_{Lr} 线性增大,在 t_1 时刻,当 i_{Lr} 线性增大到 I_{b1} 时,模式2结束.

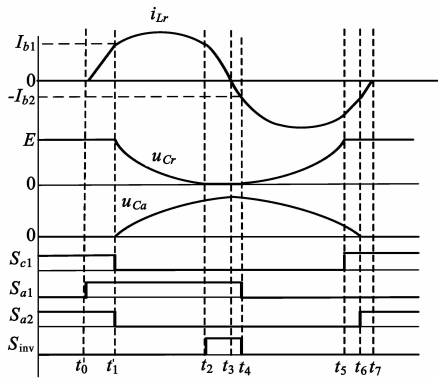


图3 电路的特征工作波形

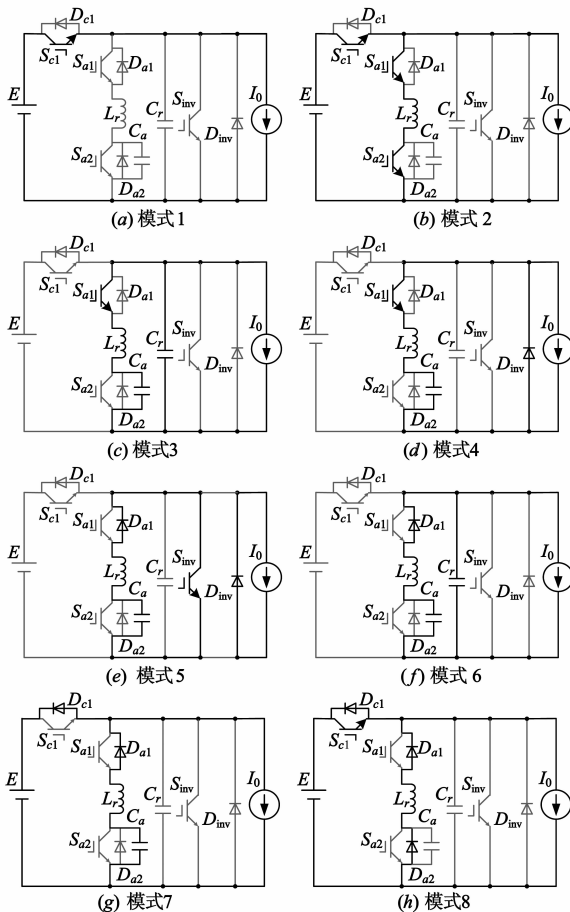


图4 各工作模式的等效电路

(3)模式3($t_1 \sim t_2$):在 t_1 时刻,同时关断 S_{c1} 和 S_{a2} ,在 C_r 的作用下,降低了 S_{c1} 关断瞬间端电压的上升率,所以 S_{c1} 实现了零电压关断;在 C_a 的作用下,降低了 S_{a2} 关断瞬间端电压的上升率,所以 S_{a2} 也实现了零电压关断. S_{c1} 和 S_{a2} 关断以后, L_r 、 C_a 和 C_r 开始谐振, L_r 和 C_a 被充电, C_r 放电. i_{Lr} 和 u_{Ca} 逐渐增大, u_{Cr} 逐渐减小. 当 u_{Ca} 与 u_{Cr} 相等时, i_{Lr} 增加到最大值,然后 L_r 和 C_r 放电, C_a 继续被充电, i_{Lr} 开始减小. 在 t_2 时刻,当 u_{Cr} 减小到零时,模式3结束.

(4)模式 4($t_2 \sim t_3$):在 t_2 时刻,当 C_r 的端电压减小到零时, D_{inv} 导通,负载电流开始通过 D_{inv} 续流,同时 L_r 和 C_a 继续谐振, L_r 放电, C_a 被充电。 u_{Ca} 继续增大, i_{Lr} 继续减小。当 i_{Lr} 减小到零时, u_{Ca} 增加到最大值,模式 4 结束。

(5)模式 5($t_3 \sim t_4$):从 t_3 时刻开始, L_r 和 C_a 继续谐振, C_a 放电, L_r 被充电, u_{Ca} 开始减小, i_{Lr} 开始反向增大,因为电流开始流过 S_{inv} ,所以桥臂处于短路状态。在 t_4 时刻,当 i_{Lr} 反向增大到 I_{b2} 时,模式 5 结束。

(6)模式 6($t_4 \sim t_5$):在 t_4 时刻,同时关断 S_{a1} 和等效开关 S_{inv} ,因为此时 D_{a1} 导通,流过 S_{a1} 的电流等于零,所以 S_{a1} 实现了零电流关断;因为此时直流母线电压仍为零,所以 S_{inv} 实现了零电压关断。等效开关 S_{inv} 关断以后,桥臂恢复正常状态,相当于桥臂上的主开关在直流母线电压为零的期间内完成了零电压切换。从 t_4 时刻开始, L_r 、 C_r 和 C_a 开始谐振, C_a 放电, L_r 和 C_r 被充电。 u_{Ca} 开始减小, u_{Cr} 开始增大, i_{Lr} 继续反向增大。当 u_{Ca} 与 u_{Cr} 相等时, i_{Lr} 增加到反向最大值,然后 L_r 和 C_a 放电, C_r 继续被充电, i_{Lr} 开始反向减小。在 t_5 时刻,当 u_{Cr} 增大到 E 时,模式 6 结束。

(7)模式 7($t_5 \sim t_6$):在 t_5 时刻,当 u_{Cr} 增大到 E 时, S_{c1} 的端电压等于零, D_{c1} 开始导通,所以在 t_5 时刻开通 S_{c1} , S_{c1} 实现了零电压开通。从 t_5 时刻开始, L_r 和 C_a 谐振, L_r 和 C_a 继续放电, u_{Ca} 继续减小,当 u_{Ca} 减小到零时,模式 7 结束。

(8)模式 8($t_6 \sim t_7$):从 t_6 时刻开始, L_r 承受的电压值为 E , L_r 继续放电, i_{Lr} 线性减小。 i_{Lr} 大于负载电流时,电流流过 D_{c1} ; i_{Lr} 小于负载电流时,电流开始流过 S_{c1} 。在 t_7 时刻,当 i_{Lr} 减小到零时,模式 8 结束。然后电路返回模式 1,开始下一个开关周期的工作。

3 实验结果

为验证本文提出的谐振直流环节逆变器的有效性,制作了功率为 5kW 的实验样机,输出端接三相阻感性负载。实验电路的参数值为输入直流电压 $E = 300V$,最大输出电流 $I_{0peak} = 30A$,输出功率 $P_0 = 5kW$,谐振电感 $L_r = 70\mu H$,谐振电容 $C_a = 100nF$,缓冲电容 $C_s = 33nF$,死区时间 $\Delta = 3\mu s$,输出频率 $f_0 = 60Hz$,开关频率 $f_c = 10kHz$ 。

直流母线电压 u_{bus} 的实验波形如图 5(a) 所示,可以看出直流母线电压从 E 下降到零,而后又重新上升到 E ,出现了零电压凹槽。谐振电容 C_a 的端电压 u_{Ca} 的实验波形如图 5(b) 所示,与图 3 所示的特征工作波形基本一致。图 5(a) 和图 5(b) 的实验波形验证了逆变器工作原理的正确性。该软开关逆变器在输出频率为

60Hz 时的三相的相电流的实验波形如图 5(c) 所示,可以看出该软开关逆变器的相电流的波形依然平滑,畸变很小。图 5(d) 为主开关没并联缓冲电容时,硬开关逆变器的主开关 S_1 开通和关断时的端电压和电流实验波形,可以看出 S_1 开通和关断时的电流变化率和电压变化率都很大。开通和关断时,电流波形产生尖峰和震荡,电压和电流存在明显的重叠区,开关损耗较大。图 5(e) 和图 5(f) 分别为软开关逆变器在重载工况下的主开关 S_1 开通和关断时的端电压和电流实验波形,从图 5(e) 可以看出主开关 S_1 开通时,端电压已经降到零, S_1 实现了零电压开通;从图 5(f) 可以看出主开关 S_1 关断时,其端电压以相对较低的变化率上升, S_1 实现了零电压关断。所以从图 5(e) 和图 5(f) 可以看出重载工况下主开关 S_1 实现了零电压开关,相比于硬开关逆变器,开关损耗明显降低。图 5(g) 和图 5(h) 分别为软开关逆变器在轻载工况下的主开关 S_1 开通和关断时的端电压和电流实验波形,同样可以看出轻载工况下主开关 S_1 也实现了零电压开关。所以在全负荷范围内,该软开

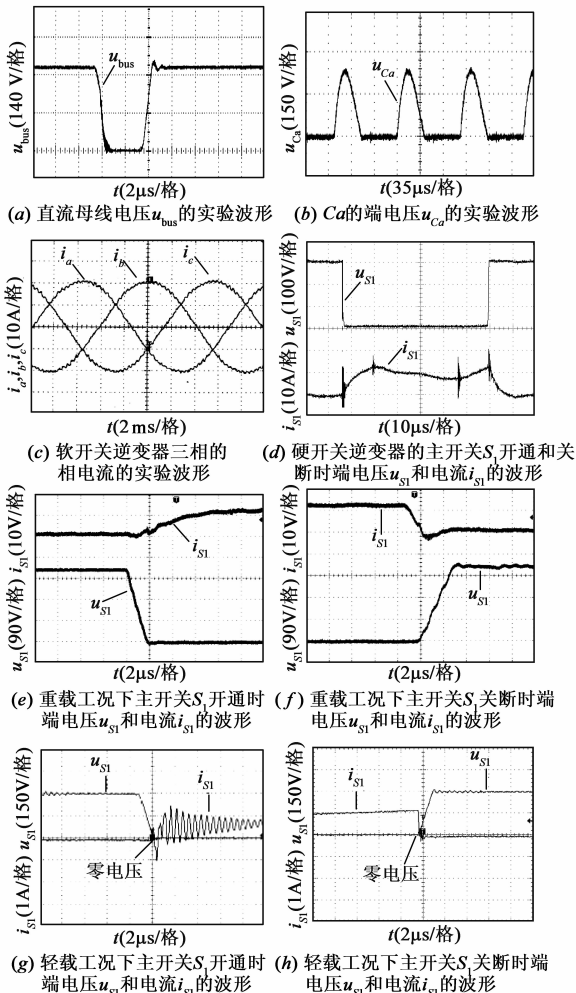


图5 实验波形

关逆变器的主开关都可以实现零电压开关. 在输出功率达到额定功率 5kW 时, 软开关逆变器的实测效率达到 93.2%, 相比于硬开关逆变器, 效率提高 3%.

4 结论

本文提出了一种具有并联谐振直流环节的新型软开关电压源逆变器的拓扑结构, 相比于相关文献提出的拓扑结构, 其直流母线之间没有串联大电容, 没有中性点电位的变化问题. 通过实验研究得出如下结论: (1) 该并联谐振直流环节逆变器的直流母线电压周期性形成零电压凹槽, 使逆变器的开关器件在母线电压为零时完成切换, 实现零电压开关, 有利于开关损耗的减小和提高开关频率; (2) 逆变器输出的相电流被很好地控制, 电流波形为光滑的正弦波; (3) 在输出功率 5kW 的原理样机上得到了 93.2% 的实测效率, 相对于硬开关逆变器, 效率有明显提高.

参考文献

- [1] Bellar M D, Wu T S, Tchamdjou A, et al. A review of soft-switched dc-ac converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(4): 847 - 860.
- [2] 祁晓蕾, 阮新波. 一种新的双幅控制有源箝位谐振直流环节逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(27): 42 - 47.
Qi Xiaolei, Ruan Xinbo. A novel two-amplitude active-clamped resonant DC link inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 42 - 47. (in Chinese)
- [3] 王强. 无中性点电位变化的并联谐振软开关逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(3): 36 - 42.
Wang Qiang. Parallel resonant soft-switching inverter without change of neutral point potential[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(3): 36 - 42. (in Chinese)
- [4] 王强. 零电压持续时间不依赖于负载电流的谐振直流环节逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 33 - 39.

Wang Qiang. Resonant DC link inverter with duration of zero-voltage independent of load current [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(6): 33 - 39. (in Chinese)

- [5] Pan Zhiyang, Luo Fanglin. Transformer based resonant DC link inverter for brushless DC motor drive system [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2005, 20(4): 939 - 947.
- [6] 王强. 新型零电压开关谐振直流环节逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 74 - 80.
Wang Qiang. Novel zero-voltage switching resonant DC link inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(27): 74 - 80. (in Chinese)
- [7] 王强, 王天施. 用于电机驱动的并联谐振直流环节逆变器[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(1): 58 - 64.
Wang Qiang, Wang Tianshi. Parallel resonant DC link inverter for motor drives [J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(1): 58 - 64. (in Chinese)

作者简介



王 强(通讯作者) 男, 1981 年 10 月出生, 博士, 辽宁石油化工大学信息与控制工程学院副教授, 2012 年 12 月进入南京航空航天大学电气工程流动站从事博士后研究工作, 主要研究方向为软开关逆变器的电路拓扑及控制.

E-mail: master2007@126.com



邢 岩 女, 1964 年 10 月出生, 博士, 南京航空航天大学自动化学院教授、博士生导师, 主要研究方向为电力电子变换器、新能源发电与变换.