

谐振型软开关逆变器控制信号补偿研究

安文斗¹, 卿 钦², 郑 磊¹, 李直霖¹, 王开云¹

(1. 煤炭科学研究总院重庆研究院, 重庆 400037; 2. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400030)

摘要:针对谐振型逆变器输出电压波形畸变及开关管发烫的问题,分析了逆变器的拓扑结构及软开关控制原理,推导了并联谐振的频率响应特性,分析了波形过零点畸变的原因是由于芯片响应时间对控制信号产生了时延。针对信号时延问题,设计了基于 CD4046 锁相环频率跟踪技术的补偿电路,给出了补偿电路的电路图。最后,研究结果表明所设计的补偿电路有效地减小了芯片响应时间对逆变器造成的影响,使电路工作在软开关状态下,减少了开关器件的动态损耗。

关键词:逆变器;软开关;信号时延;频率跟踪

中图分类号: TM131.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)02-0248-03

Research on compensator of control signal in soft-switching resonant converter

AN Wen-dou¹, QING Qin², ZHENG Lei¹, LI Zhi-lin¹, WANG Kai-yun¹

(1. Chongqing Institute of Coal Science Research Institute, Chongqing 400037, China;

2. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Aiming at the problems of distorted waveform and hot switches of the converter, the topology and soft-switching control principle of the converter was analyzed, the frequency response of parallel resonant circuit was deduced, the output waveform of the converter was showed, the aberrance of waveform in zero-crossing was found and the delay which the response time of the chips to the control signal was the reason. Aiming at the problem of signal delay, the compensatory circuit of phased-lock frequency tracking technology based on CD4046 was designed and the schematic circuit was given. At last, The results indicate that the designed compensatory circuit decreases the affect of response time to the converter, makes sure the converter work under soft-switching state and decreases the dynamic loss of the switches.

Key words: converter; soft-switching; signal delay; frequency tracking

0 引 言

随着软开关控制技术的发展及响应国家节能减排的号召,越来越多的功率变流装置中使用了软开关控制技术,软开关技术的诞生很大程度上减小了功率变流装置的动态开关损耗,缩小了散热器的体积^[1-2]。软开关技术在得到成功应用的同时难免存在一些问题,如谐振型逆变器的软开关电路中的控制信号从逆变器输出采样信号到驱动信号会产生一定的时延,从而导致逆变器发热加重。

本研究就软开关控制信号的时延问题展开研究,分析信号产生时延的原因,并设计了相关补偿电路。

1 谐振逆变电路拓扑

如图 1 所示为全桥型逆变电路的拓扑结构,电路由直流电压源 V_d 、直流电感 L_d 、4 个开关管及并联 LC 谐振网络组成,电路正常工作时需要两组相位相反的驱动脉冲分别控制两组开关管,其中 Q_1 和 Q_4 组成一组, Q_2 和 Q_3 组成另外一组。即当 Q_1 和 Q_4 同时开通时, Q_2 和 Q_3 同时截止;当 Q_2 和 Q_3 同时开通时, Q_1 和 Q_4 同时截止,两组交替导通各 180°,保证同一桥臂上的两个开关管不能同时导通,从而在 AB 端口形成正负交变的方波。

下面推导并联谐振对交变方波的频率响应表达

式,RLC 并联谐振电路的简化模型如图 2 所示,图中 i_a 为正弦波电流源,回路阻抗可表示为:

$$Z(j\omega) = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C + \frac{1}{j\omega L}} \tag{1}$$

令:

$$s = j\omega, Q = \frac{R}{\omega_0 L}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

则有:

$$Z(s) = R \frac{\frac{s}{Q\omega_0}}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + \frac{s}{Q\omega_0} + 1} \tag{2}$$

当 $s = j\omega_0$ 时, $Z(s) = R$, 说明电路在完全谐振时流过负载 R 的电流大小等于电流源的电流, 即 $i_R = i_a = I_{am} \sin \omega t$, LC 并联支路相当于断路, 但是两条支路中都流过很大电流。这时, 整个并联谐振电路的阻抗表现为纯电阻性质。

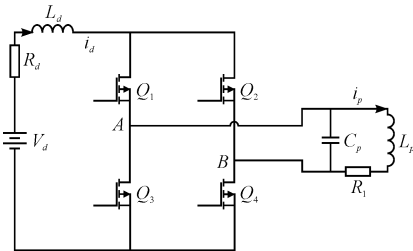


图 1 全桥型逆变器拓扑

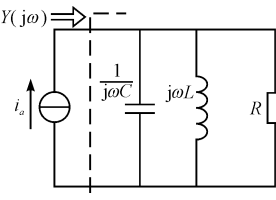


图 2 并联谐振电路

流过电容或电感的电流为电流源的 Q 倍。谐振时,回路两端电压为:

$$U_a = R(I_{am} \sin \omega_0 t) = I_{am} R \sin \omega_0 t \tag{3}$$

流过电感的电流等于流过电容的电流,其大小为:

$$i_l = i_c = \frac{U_a}{1/j\omega_0 C} = I_{am} R \omega_0 C \sin \omega_0 t \tag{4}$$

即:

$$\frac{i_l}{i_a} = \frac{i_c}{i_a} = R \omega_0 C = Q \tag{5}$$

2 软开关控制框图

逆变器的控制原理框图如图 3 所示,由于逆变器两组开关管之间的切换条件是谐振电容两端电压过零

点,即过零切换,被称为软开关逆变器 (Zero Voltage Switching, 简称为 ZVS)。由采样电路对逆变器输出电压波形采样,采样信号经由信号处理及功率放大等电路用于驱动逆变器的 4 个开关器件。从图 3 原理框图可以看出,路的控制信号完全取自逆变器输出,属于闭环控制,逆变器的工作频率完全由 LC 谐振频率决定,与输入电压电流的幅值无关,即 $f = 1/(2\pi \sqrt{L_p C_p})$ 。

电路输入的直流电源在逆变桥的作用下生成交流方波电源,逆变桥可由 IGBT 大功率开关器件组成或由 MOSFET 中小型功率器件组成。生成的交流方波电源在 LC 谐振网络的作用下即生成了交流正弦波电源,此时,完成了由直流电到交流电的逆变。

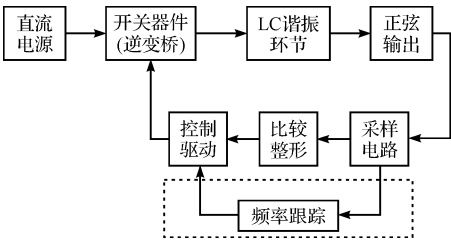


图 3 逆变器控制原理框图

电路的控制原理是对生成的交流正弦电源进行采样,采样后再经波形转换生成方波信号,经光耦和频率跟踪芯片后生成逆变桥的控制信号。

3 时延产生及补偿电路

由于信号在传输过程中,以及芯片响应信号都有一定程度的延时,特别是当电路工作在高频状态时,信号延时不可忽略不计,否则影响逆变器开关管的工作状态、加大开关器件的动态损耗、增大逆变器的电磁干扰。下面以光耦为例分析芯片对信号的影响。

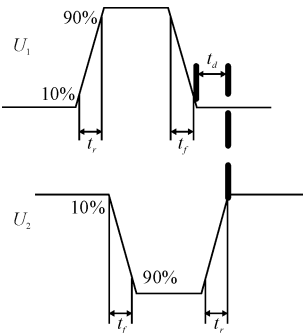


图 4 光耦的输入信号与输出信号

光耦输入信号与输出信号如图 4 所示, U_1 是光耦的输入信号, U_2 是光耦的输出信号, t_r 为信号的上升时间, t_f 为信号的下降时间, t_d 为输出信号与输入信号的时差。6N137 的芯片资料上介绍 t_r 和 t_f 均为 30 ns,

t_d 约为 75 ns,加起来约为 135 ns,即光耦对信号的时延大小为 135 ns,类似可以得到其他芯片对控制信号的延时时间。

为了减小芯片延时对逆变器工作的影响,课题设计了一种基于 CD4046 锁相环技术的频率跟踪补偿电路,频率跟踪器的基本原理如图 5 所示^[3-4]。

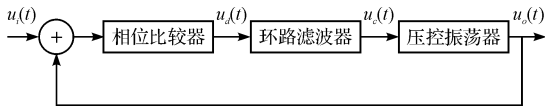


图 5 锁相环原理图

锁相环是一种反馈控制系统,也是闭环跟踪系统,其输出信号的频率跟踪输入信号的频率。当输出信号的频率与输入信号的频率一致时,输出电压与输入电压保持固定的相位差值,故称为锁相环路,简称锁相环。在应用时,只需要把相位差设置为零,即可实现输出信号与输入信号的零相位差频率跟踪。

CD4046 的外部连接如图 6 所示,图中 R_3 、 R_4 和 C_4 构成低通滤波器,它是锁相环正常工作中不可忽视的一部分,其时间常数限制了系统跟踪输入信号频率变化的速度,同时也限制了捕捉范围^[5]。另外,环路滤波器还能防止噪声电压干扰环路的正常工作。这是由于存储在环路滤波器上的电容能帮助很快重新捕捉因噪声尖峰或其它瞬态效应丢失的信号。如果时间常数过长,环路跟踪变化较快的输入频率时会引起过度延时;如果时间常数过小,环路跟踪变化快速的输入信号会引起压控振荡器输出频率的反常变化^[6-7]。

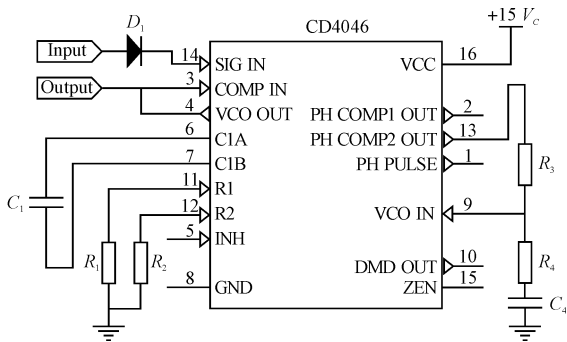


图 6 CD4046 外围电路

根据逆变器的工作频率 $f = 1/(2\pi \sqrt{L_p C_p})$ 来设定 CD4046 的频率跟踪范围 $f_{\min} : f_{\max}$,由锁相环跟踪的原理图可以得到频率跟踪的相位等效模型^[8-9],如图 7 所示。

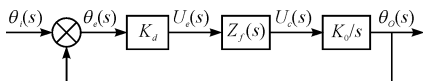


图 7 锁相环相位等效模型

其中,鉴相器增益 $K_d = V_{cc}/(4\pi)$,CD4046 供电电源 $V_{cc} = 15\text{ V}$;压控振荡器增益 $K_o = 2\pi(f_{\min} : f_{\max})/(V_{cc} - 2)$ 。

图 6 中的无源低通比例积分滤波器,其增益为:

$$Z_f(s) = \frac{sC_4R_4 + 1}{sC_4(R_3 + R_4) + 1} \quad (6)$$

由图 7 得频率跟踪控制系统闭环传递函数为:

$$H(s) = \frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{K_o K_d \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(s + \frac{1}{C_4 R_4} \right)}{s^2 + s \frac{K_o K_d C_4 R_4 + 1}{C_4 (R_3 + R_4)} + \frac{K_o K_d}{C_4 (R_3 + R_4)}} \quad (7)$$

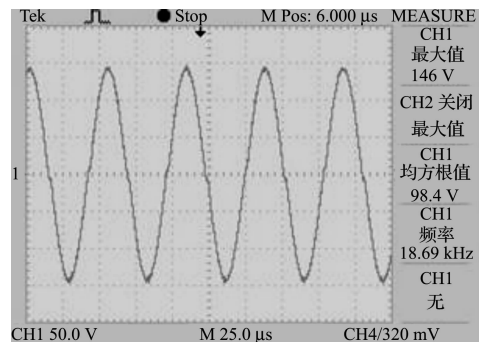
由此可得该 2 阶系统的自由振荡频率 ω_n 和阻尼系数 ζ 分别为:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_o K_d}{C_4 (R_3 + R_4)}} \quad (8)$$
$$\zeta = \frac{1}{2} \omega_n \left(C_4 R_4 + \frac{1}{K_o K_d} \right)$$

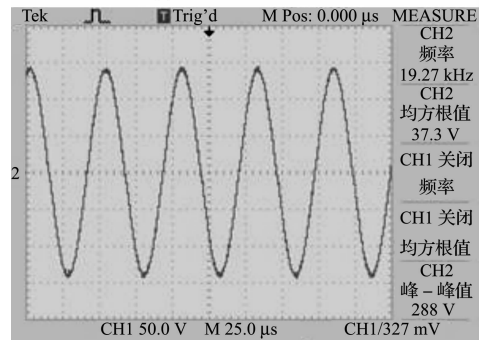
对于 2 阶系统,工程上常取 $\zeta \approx 0.707$,为了保证系统的稳定性^[10],取 $\omega_n \leq (2\pi f_{\min})/10$,根据上式可选取 $C_4 = 0.01\text{ }\mu\text{F}$, $R_4 = 51\text{ }\Omega$, $R_3 = 5.1\text{ k}\Omega$ 。

4 结果与分析

针对上述方法,本研究制作了一台样机进行实验。频率跟踪电路加入前后的区别如图 8 所示。



(a) 逆变器输出电压波形



(b) 加入频率跟踪逆变器输出电压波形

图 8 实验波形

3 结束语

从仿真结果可看出,所采用的改进型 CMOS 环形振荡器电路对电压具有较强的容忍度,其频率随电压的变化小于 5%,满足了驱动芯片对振荡器的要求。不足之处在于,电路在不同的工艺角下,振荡频率值的变化比较大。总体而言,此振荡器完全可满足 DC/DC 转换器、充电器等电源管理芯片的振荡器要求,且线路简单,十分适合低成本电源管理芯片的应用。

参考文献 (References):

- [1] STEELE R V, HAUSKEN T. High-Brightness LED Market Review and Forecast 2009[R]. Strategies Unlimited, 2009.
- [2] RAZAVI B. 模拟 CMOS 集成电路设计[M]. 陈贵灿,译. 西安:西安交通大学出版社, 2002.
- [3] ALLEN P E, HOLBERG D R. CMOS 模拟集成电路设计[M]. 马 军,译. 北京:电子工业出版社, 2005.

(上接第 250 页)

实验参数:输入直流电源 48 V;直流电感 2.5 mH;谐振电容 1 μ F;谐振电感 64 μ H;谐振频率由谐振回路参数决定 $f = 1/(2\pi \sqrt{L_p C_p}) = 20$ kHz。

从实验波形可以看出,没有加入频率跟踪电路的输出波形如图 8(a)所示,可以看出波形在过零点时有些许畸变,原因是由于控制信号的时延(包括两组控制信号切换的时间差)造成的;加入了频率跟踪电路的输出波形如图 8(b)所示,对比图 8(a)可以得到频率跟踪电路的加入一定程度上改善了输出波形的质量。

5 结束语

本研究在分析谐振逆变器工作原理的基础上,给出了并联谐振网络的频率响应表达式,并针对谐振开关逆变器输出波形过零点畸变问题,设计了频率跟踪电路,给出了频率跟踪芯片 CD4046 的外围连接图。

研究结果表明该频率跟踪电路能很好的实现输出信号与输入信号的零相位跟踪。针对外围的无源低通滤波器,做了详细的推导并给出了传递函数表达式。最后,通过实验验证了频率跟踪电路的跟踪效果达到了预期效果。

参考文献 (References):

- [1] 马 皓,周雯琪. 电流型松散耦合电能传输系统的建模分析[J]. 电工技术学报, 2005, 20(10): 66-71.
- [2] REIS A D, ROCHA J F, GAMEIRO A S, et al. Synchro-

- [4] BAKER R J, HARRY W U, BOYCE D E. CMOS Circuit Design, Layout and Simulation[M]. IEEE Press, 1998.
- [5] 张兆华,乐瑞峰,刘理天. 以环形振荡器作为敏感单元的加速度传感器[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2004, 44(1): 81-84.
- [6] ZHANG Zhao-hua, LIU Li-tian. A novel accelerometer using MOS ring oscillators[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology. Shanghai: [s. n.], 2001: 843-846.
- [7] 叶春晖,冯勇建. 一种具有高输出精度及电源电压抑制能力的 CMOS 环形振荡器的设计[J]. 厦门大学学报, 2008, 47(4): 519-523.
- [8] 胡二虎,汪东旭. 一种频率稳定的集成 CMOS 环形振荡器[J]. 微电子学, 2003, 33(3): 259-261.
- [9] 陈 康. 电流控制模式白光 LED 驱动芯片设计[D]. 电子科技大学微固学院, 2006: 27-32.
- [10] Analog IC Design Tutorial for Schematic Design and Analysis using Spectre[S]. Cadence Design Systems, Inc., USA.

[编辑:张 翔]

nizers based on carrier phase lock Loop and on symbol phase lock loop[C]//ICECS 2008. 15th IEEE, 2008: 279-282.

- [3] 刘爱忠,刘俊华,肖 岚. 数字锁相技术在逆变器并联系统中的应用[J]. 电力电子技术, 2007, 41(7): 16-20.
- [4] 熊腊森,全亚杰. CD4046 锁相环在感应加热电源中的应用[J]. 研究与设计:电焊机, 2000(6): 14-16.
- [5] 童诗白. 模拟电子技术基础[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.
- [6] ZHOU Guo-liang, SHI Xin-chun, FU Chao, et al. Operation of a Three-phase Soft Phase Locked Loop Under Distorted Voltage Conditions Using Intelligent PI Controller[C]//ICECS 2006. 13th IEEE, 2006: 368-377.
- [7] BOYS J T, GREEN A W. Inductively coupled power transmission concept-design and application[J]. IPENZ rans, 1995, 22(1): 1-9.
- [8] RHO Sung-chan. A study on power transmission system using resonant frequency tracking method and contactless transformer with multiple primary winding[C]//Proceeding of International Conference on Electrical Machines, 2007: 1635-1639.
- [9] MA Hao, ZHOU Wen-qi. Modeling a current source push-pull resonant converter for loosely coupled power transfer systems[C]//The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2004(2): 1024-1029.
- [10] 王照峰,王仕成,苏德伦. 锁相环电路的基本概念及应用研究[J]. 电气应用, 2005, 24(8): 34-39.

[编辑:张 翔]