

基于 DSP 中频逆变器复合控制的实现研究

李金刚, 钟彦儒, 马 鑫
(西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘要:为了优化中频逆变器的输出性能,提高输出精度,提出将常用的电压、电流双闭环反馈控制和重复控制方法相结合,形成一种复合控制方法。介绍了控制器设计,在 Matlab/Simulink 中建立了中频逆变器仿真模型,仿真结果表明复合控制方法具有优良的动静态性能。基于复合控制法设计了控制系统的软硬件,实现了基于 TMS320F240 型 DSP 的中频逆变器控制系统。实验证明,采用复合控制时中频逆变器有较好的动、静态性能,该方法不失为一种先进的中频逆变器控制方法。

关键词:逆变器;脉宽调制;双闭环反馈控制;重复控制

中图分类号:TM464

文献标识码:A

文章编号:1000-100X(2010)01-0071-03

Research on Multiple-control of Mid-frequency Inverter Based on DSP

LI Jin-gang, ZHONG Yan-ru, MA Xin

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract:In order to improve the character of inverter,a new control method should be used.The multiple control method is built on the basis of double closed loop two closed feedback control and repetitive control,the design method of controller is introduced.The simulation model is built and the result proves the character of multiple control method is good.The software and hardware of control system are designed,the control system of inverter is achieved based on TMS320F240 DSP. The experimental results prove that the proposed design is an advanced control method of medium frequency inverter.

Keywords:inverter; pulse width modulation; double closed loop; multiple-control

1 引言

采用正弦脉宽调制(SPWM)技术的中频正弦波逆变电源广泛应用于航空航天、舰船、雷达等领域。

提高电源性能关键是改善逆变器控制策略^[1-2]。在目前众多控制策略中,电压、电流双闭环反馈控制和重复控制结构简单、易于实现,实际中较为常用^[3]。随着 DSP 等高性能数字控制芯片的快速发展和性能的进一步提高,可以实现一些复杂而性能优良的控制策略。双环反馈控制的优点是响应迅速,动态性能较好。但是其稳态误差较大,静态特性不佳。重复控制是基于控制理论内模原理的一种控制策略,对跟踪重复性给定或抑制重复性扰动系统的控制效果较好,但由于其系统动态响应至少延迟一个周期,故动态性能较差^[4-5]。

将上述两种控制方法结合便构成了这里所述的复合控制方法,使中频逆变器控制系统既具有多环反馈控制系统的理想的动态响应特性,又可利用重复控制检测系统的稳态误差,通过逐周期修正提高输出电压的幅值精度,并补偿由负载引起的波形畸变。实现了基于 DSP 的 400 Hz 正弦波逆变电源的复合控制。

2 中频逆变器的复合控制原理

逆变器主电路及复合控制原理如图 1 所示。设负载两端的中频正弦波电压为 u_o , 逆变器输出端电压为 u , 则负载为阻性 R 时的系统传递函数为:

$$G_0(s) = \frac{U_o(s)}{U(s)} = \frac{R}{LCRs^2 + (L+R_1RC)s + R+R_L} \quad (1)$$

式中: R_L 为滤波电感等效串联电阻。

滤波电容等效串联电阻很小,可以忽略不计。这时,可得空载时系统的传递函数为:

$$G_1(s) = \frac{U_o(s)}{U(s)} = \frac{1}{LCs^2 + R_LCs + 1} \quad (2)$$

可见空载时逆变器输出相当于一个欠阻尼二阶系统,系统稳定性较差。

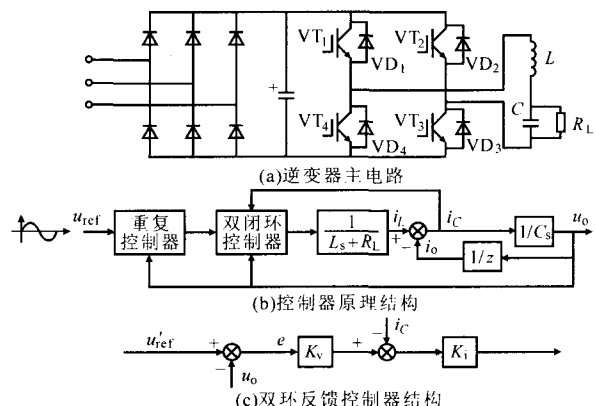


图 1 单相全桥逆变器主电路及复合控制原理
图 1b 复合控制系统由双环反馈控制器和重复

定稿日期:2009-06-02

作者简介:李金刚(1968-),男,河北泊头人,博士,研究方向为
中高频正弦波逆变电源和负载谐振逆变电源。

控制器两个部分组成。如图所示,双环反馈控制器居于控制系统内层,其目的是改善系统的动态响应特性。重复控制器居于控制系统外层,用来减小负载等因素造成的谐波失真,同时以其固有的对周期性指令近似无差的调节来弥补双环反馈控制系统稳态精度不高的缺点,基本实现对输出电压的无差调节。

3 控制系统参数设计

根据复合控制的原理,对于控制器的设计分为双闭环和重复控制两部分进行。

3.1 双环反馈控制器的设计

图 1c 中 u'_{ref} 为重复控制器的输出,与逆变器的输出电压反馈 u_o 比较,产生误差量 e 输入电压环比例控制器 K_v ,电压环控制器输出与滤波电容电流反馈 i_c 比较后输入电流环比例控制器 K_i ,电流环控制器的输出作为系统的控制量。

比例积分对于正弦给定信号无法做到无差,而积分控制又会增加输出信号的相位滞后。同时,调节器中积分部分的存在也会使调节器的输出单侧饱和,给系统的控制带来一定的难度。调节器中一旦含有微分部分,则给定与反馈信号中的高频干扰信号将被大大增强,使得与三角载波相比较的信号波中含有大量的高频干扰成分,影响正常的开关控制过程。所以调节器中不宜含有微分部分。因此,系统中电压环、电流环调节器均设置为比例调节器。

3.2 重复控制器的设计

根据重复控制原理,若系统给定或扰动为单一频率的正弦信号,在控制器中存在正弦信号模型:

$$G(s) = \frac{\omega}{\omega^2 + s^2} \quad (3)$$

若该正弦信号与指令信号同频,则可实现系统无静差跟踪。若外部信号含有多种频率成分,则要给每种频率设置一个模型,实际中这是不可实现的。针对周期性扰动的特点,将重复控制的模型改进为:

$$G(s) = \frac{1}{1 - e^{-Ts}} \quad (4)$$

式中: T 为给定信号的基波周期。

其数字离散化表达式为:

$$G(z) = \frac{1}{1 - z^{-N}} \quad (5)$$

式中: N 为一个基波周期的采样次数。

等效结构图如图 2a 所示。这种重复信号发生器理论上可以实现周期给定的无静差,但是给系统带来了 N 个位于单位圆上的开环极点,对系统的稳定性和鲁棒性很不利,因此需要进一步改进。

系统中设置的滤波器 $Q(z)$ 是一个非常关键的参数。一般情况下 Q 有两种:设计低通滤波器或者取为一个略小于 1 的常数,以减弱积累的效果。为了设计和调试简化,取 $Q=0.98$ 进行分析。由此也产生

了静差,但是这种结构是系统稳定所必须的。其改进结构图如图 2b 所示。图 2c 示出重复控制的系统结构,其中重复信号发生器与补偿滤波器 $S(z)$ 是组成重复控制器的主要部分。

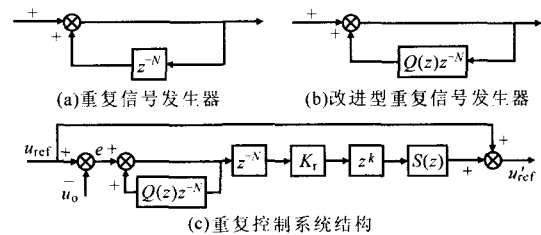


图 2 重复信号发生器与重复控制器结构

电压、电流双闭环反馈作用使系统已经稳定,故为了简化参数的设计, $S(z)$ 设置为二阶低通滤波器即可达到要求。为使控制动作延迟一个周期进行,将周期延时环节 z^{-N} 与重复信号发生器串联。加入重复控制器增益 K_r 来调节控制器校正量的幅值,其取值范围为 $0 < K_r \leq 1$ 。还需串联超前相位补偿 z^k 环节,用于 $S(z)$ 和控制对象所带来的总相位滞后。上述环节构成了完整的重复控制器。

如果将这种重复控制器直接串联在系统前向通道上,为了实现控制系统的超前控制而设置的 z^{-N} 就会在逆变电源开机时使输出量对指令的跟踪速度受到重复控制器的限制。为了解决这个问题,通过前馈来改进系统结构,即为待跟踪的指令设置前向通道。这样在开机时,系统对指令的跟踪主要通过前向通道来实现,而重复控制器主要是用来抑制系统的误差。这样的结构更为合理,系统的性能也可以得到改善。双闭环系统为一个稳定系统,重复控制器可视为一个嵌入的控制器,它在系统当中所起的作用就是用来检测系统的误差,然后通过原有指令上叠加校正量来减小误差。完整的重复控制器结构如图 2c 所示。根据以上分析和设计得到的复合控制系统如图 3 所示。

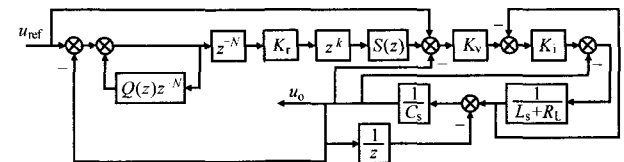


图 3 复合控制动态结构图

4 控制系统的仿真

根据图 3 所示,在 Matlab/Simulink 中建立了其仿真模型,仿真模型中将各个模块按功能的不同组合成子系统,所以重复控制器、反馈控制器是实现复合控制的子系统。采用复合控制时系统仿真波形如图 4 所示。

仿真参数为: $K_v=3, K_i=4, Q=0.98, K_r=0.7$, 此时 K_v 和 K_i 没有取为双闭环控制仿真中的整定值 4 和 5, 因重复控制器的加入对输出产生调节作用,系统在

$K_i=4, K_f=5$ 时会产生振荡,但如果减小过多则会减弱双闭环控制器的调节作用,使系统出现如单一重复控制时调节时间过长的现象。仿真表明 $K_i=3, K_f=4$ 时两种控制方法的控制器均能产生调节作用,产生较好的控制效果。图 4b 示出采用复合控制突加负载时的仿真波形。可见采用复合控制后,系统突加负载的响应迅速,且同时具备了两种控制方法优良的动、静态性能,因此复合控制是一种先进的逆变器控制方法。与单一控制方式相比,复合控制在静态性能上具有重复控制,稳态误差小,输出电压与参考电压几乎重合的优点;动态过程有双环反馈控制调节迅速,抗干扰能力强的优点。

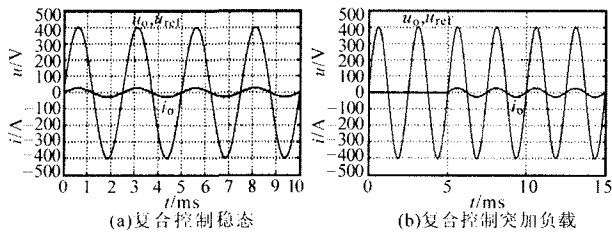


图 4 复合控制仿真波形

仿真结果证明,复合控制方法在控制效果上与理论分析符合,发挥了双闭环控制和重复控制的优点,同时抑制了各自的缺点,是一种更有优势的控制方法。故采用这种复合控制方法进行系统的设计。

5 控制方法的 DSP 实现与实验结果

重复控制策略虽有较好的动静态特性,但其控制策略复杂,必须建立在微机控制的基础之上。基于 DSP 的重复控制器控制系统以 TMS320F240 型 DSP 芯片为核心,主要完成复合控制算法实现、输出 PWM 控制脉冲、定时中断采样、电压电流采样值的 A/D 转换以及系统过压、过流保护等。

主电路逆变器采用全控型器件 IGBT。设计的实验电路参数为: $L=1.1\text{ mH}, C=48.8\text{ }\mu\text{F}$,输出电压频率 400 Hz,逆变器的开关频率为 16 kHz。图 5 示出复合控制算法流程图。

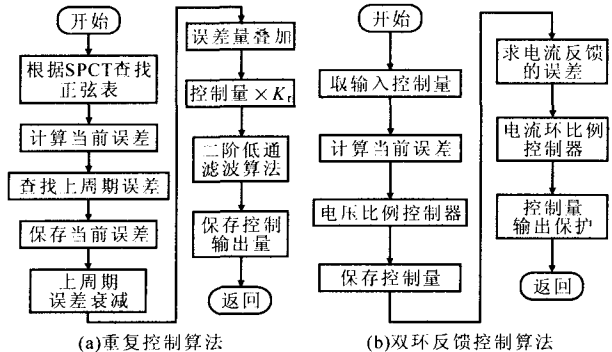


图 5 控制算法流程图

正弦参考值设置为数据表,程序中由自定义的计数器确定给定值地址,通过查表获得给定值,反馈值由采样中断程序得到,与给定比较得出误差值进

行算法运算,控制算法最终的结果保存在自定义空间中,作为下次全比较单元比较寄存器的更新值。

基于复合控制器的 400 Hz 逆变电源实验结果如图 6 所示。其中图 6a 为电源稳态输出波形。可见输出电压波形具有很好的稳定性,正弦度良好,表明复合控制系统具有较好的输出性能。对输出电压波形做傅立叶分析如图 6b 所示。可见逆变器输出电压的谐波总畸变率 $THD_u \approx 2.5\%$,谐波含量较低。图 6c 为突加负载 150 Ω 时的逆变器输出电压和负载电流波形。由图中可以观察到,在突加负载的瞬间逆变器振荡很小,波形的正弦度也很好。在一个周期内已经基本进入稳态,复合控制中双环反馈控制起到了快速调节的作用。由此可见复合控制使逆变器同时具有较好的动静态性能。

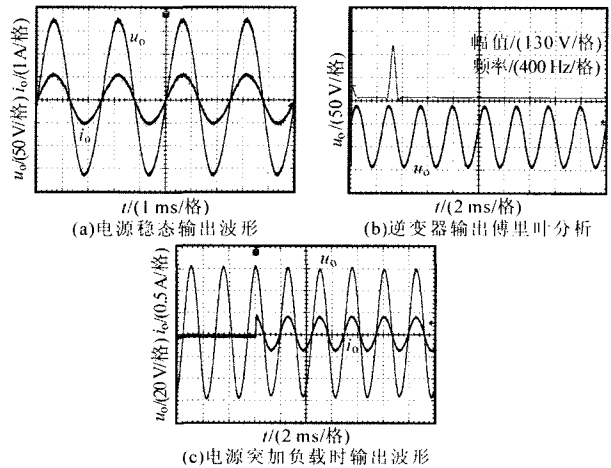


图 6 实验波形

6 结论

由实验结果可知,所设计的基于 DSP 的复合控制逆变器具有很好的输出特性。系统输出稳态精度高,谐波含量较低。对设备进行的突加突减负载实验表明,系统可以保持很高的稳态输出性能,而且突加突减负载时系统响应迅速。受篇幅所限未给出更多的实验波形。

参考文献

- [1] 刘凤君.正弦波逆变器[M].北京:科学出版社,2002.
- [2] 李翠艳.重复控制综述[J].电机与控制学报,2005,9(1):37-44.
- [3] LUO Zheng-hua, B Mahawan. Repetitive Control of Tracking Systems with Time-Varying Periodic References[A]. Proc. 37th IEEE Conf. Decision and Control[C]. 1998: 1248-1249.
- [4] 孙雪娟,王荆江,彭力,等.基于内模原理的三相电压源逆变电源的波形控制[J].中国电机工程学报,2003,23(7):67-70.
- [5] Tsai Miching, Yao Wusung. Design of A Plug-in Type Repetitive Controller for Periodic Inputs[J]. IEEE Trans. on Control Systems Technology, 2002, 10(4): 547-555.