

基于 DSP 的逆变电源锁相环的设计与研究

龚益民, 臧小惠

(常州大学城轻工学院, 常州 213164)

摘要: 采用基于 DSP 的数字锁相环(DPLL)对高频逆变电源输出频率的实时控制, 可实现逆变器工作频率对负载谐振频率的同步跟踪, 确保逆变器开关器件工作在零电压电流软开关(ZVZCS)状态, 显著减小功率器件的开关损耗和提高装置效率。文中在给出 DSP 控制的逆变电源拓扑结构基础上, 推出了适用于高频逆变电源的锁相环数学模型, 在 Z 域中对二阶数字锁相环进行了稳定性分析和动态设计。在对锁相环 Z 域传递函数分析的基础上, 得出二阶数字锁相环的稳定条件, 并给出数字锁相环的软件实现, 最后进行了实验验证。实验结果表明在 Z 域中对基于 DSP 的二阶数字锁相环的动态分析和设计是合理可行的。用此方法设计的电源具有良好的动态响应和抗扰性能。

关键词: 数字信号处理器; 锁相环; 稳定性; 高频逆变器

中图分类号: TM921

文献标识码: B

Research and Design of PLL Based on DSP in HF-Inverter

GONG Yi-min, ZANG Xiao-hui

(Changzhou Institute of Light Industry Technology, Changzhou 213164, China)

Abstract: The Digital Phase-Locked Loop(DPLL) technology based on a Digital Signal Processor (DSP) is applied to control the operating frequency of an High-Frequency-Inverter (HF-Inverter) simultaneously, so as to adapt varieties of the load resonant frequency to keep the inverter always working on ZVZCS (Zero Voltage-Zero Current Switching) mode. At the meanwhile, the losses of switching components are reduced obviously and the efficiency of the power is improved greatly on ZVZCS mode. In this paper, the topology of HF-Inverter based on DSP is presented, and PLL's mathematic model is set up, which is suitable for HF-Inverter. The stability of second order DPLL is analyzed, and the dynamic design is considered using the Z-transform technique. At the base of analyzing the Z-transfer function of DPLL, the stability condition of second order DPLL is presented. The software of the DPLL is given, and the corresponding experiment is done finally. The results of experiments show that the dynamic analysis and design of second order DPLL are reasonable and feasible. The power designed by this method has good dynamic response and noise immunity.

Key words: DSP; PLL; stability; HF-Inverter

0 引言

负载串联谐振式 DC/AC 逆变器在实际应用中, 经常因负载参数变化使电源固有谐振频率发生变化, 导致功率开关器件处于硬开关, 使电压电流应力增加, 逆变器效率降低及输出波形纹波系数增大。为改善电源质量, 应使逆变器始终工作在功率因数接近于 1 的准谐振状态, 要求逆变器开关频率 f_c 能自动跟踪负载固有谐振频率 f_0 , 并始终保证 $f_c = f_0$ ^[1]。传统的方法是利用集成锁相环 CD4046 为核心的模拟电路进行调控, 因而存在线路复杂、元件易老化、工作点漂移及一致性差等缺点。针对以上问题, 提出一种基于 DSP 的数字锁相环实现高频逆变电源频率跟踪。本文重点在 Z 域中对二阶数字锁相环的各环进行稳定性分析和动态设计, 实验结果表明对基于 DSP 的逆变电源数字

锁相环的分析和设计是合理可行的。

1 系统工作原理

基于 DSP 控制的逆变电源结构如图 1 所示^[2], AC/DC 变换电路采用单相全桥不控整流电路, DC/AC 变换电路采用 IGBT 构成的单相全桥逆变电路, 负载为感应加热装置(包括高频匹配变压器、谐振电容和感应线圈), 可以等效为 LCR 串联谐振槽路。系统中, DSP 采用 TMS320LF2407A 数字信号处理器, 其主要用于实现频率跟踪及功率调节, 功率调节采用脉冲密度调制(PDM)方式, 同时采用基于 DSP 的数字锁相环来实现 IGBT 电流过零导通/关断(ZCS)的软开关模式。

2 DPLL 的实现与性能分析

2.1 数字锁相环的工作原理

数字锁相环的实质是一个相位差自动纠偏调节系统, 系统组成如图 2 所示。

数字锁相环一般组成如图 2 所示, 它由数字鉴相器、数字滤波器和数字压控振荡器(DCO)三部分组成。

收稿日期: 2007-06-25

作者简介: 龚益民(1965-), 男(汉族), 江苏常州人, 高级工程师, 主要研究方向为微控制器及其应用与研究。

臧小惠(1980-), 男(汉族), 江苏常州人, 硕士, 主要研究方向为电力电子及电气传动。

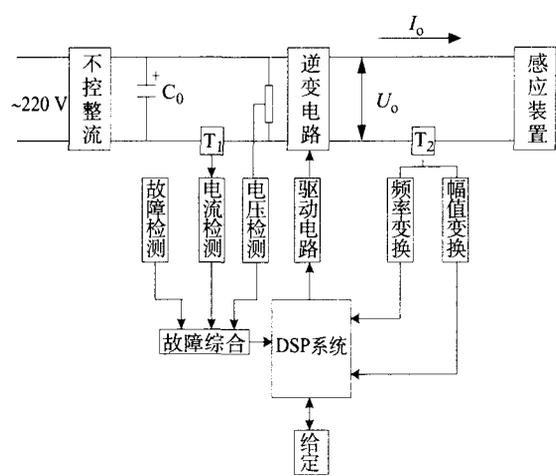


图1 基于DSP控制的逆变电源系统框图

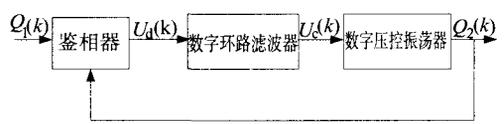


图2 数字锁相环的组成

当输入信号 $Q_1(k)$ 和输出信号 $Q_2(k)$ 之间存在相位差 $Q_e(k)$ 时，鉴相器输出与相位差大小成比例的信号 $U_d(k)$ ，经低通滤波器滤波后产生的控制电压 $U_c(k)$ 作用于压控振荡器的输入端，使输出 $Q_2(k)$ 发生变化，直至两者的相位差为零，达到同频同相为止。

系统稳态时，逆变器的输出电压与电流相位误差信号近似线性变化，数字鉴相器 PD 的模型可用常系数 K_d 表示。在工作频率范围内，数字环路滤波器可用一个传输算子 $F(Z)$ 表示。数字压控振荡器它是一个电压/频率变换装置，映射到 Z 域为 $\frac{K_0}{Z-1}$ 。

当系统在电流连续的 CCM 模式下稳态运行，对数字锁相环的各个组成部分可进行线性化分析，并经 Z 变换后，可得到如图 3 所示的线性 Z 域模型。

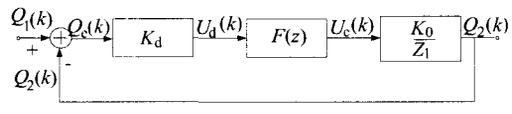


图3 数字锁相环的线性Z域模型

2.2 数字锁相环的设计

二阶数字锁相环由于分析设计简单易懂，理论上比较稳定，跟踪性能好，故在频率跟踪的实现上，系统采用基于 DSP 的二阶数字锁相环实现。

2.2.1 数字鉴相器的分析与设计

数字鉴相器的设计中，逆变器输出电压、电流采用 LM311 电压比较器进行过零检测，结构如图 4 所示。 U_{in} 为输入信号，经过由电压比较器构成的过零比较后，输出 U_{out} ， U_{out} 需经过光电隔离及斯密特整形后才可加到后续电路。

相位检测电路如图 5 所示，电压、电流的过零信号经异或门输出， u_c 就反映着两信号之间的相位误差。

2.2.2 数字环路滤波器的分析与设计

本系统选用的环路滤波器为一阶有源比例积分滤波器， S 域传递函数为：

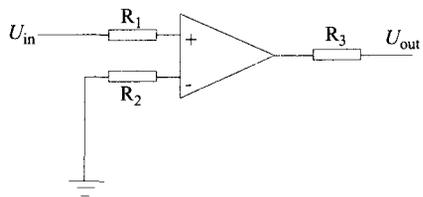


图4 鉴相过零比较器

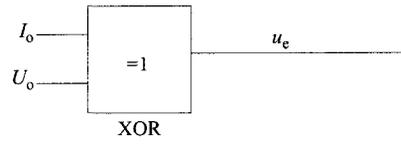


图5 相位检测电路

$$F(S) = K_p + \frac{K_i}{S} \quad (1)$$

其基本原理是将鉴相模块鉴别的相位误差大小乘以一定的比例系数产生一个比例控制参数，同时在积分系数的调节下对相位误差大小进行积分，两者的结果相加产生最终的控制信号给数字压控振荡器。式中 K_p 、 K_i 分别为比例和积分环节系数。当采样周期很短时，映射到 Z 域，有：

$$F(Z) = K_p + K_i \frac{Z}{Z-1} \quad (2)$$

其结构如图 6 所示。

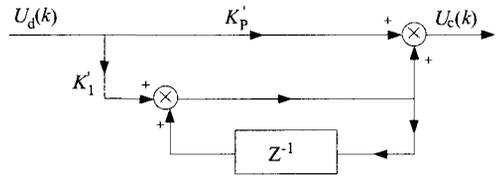


图6 数字环路滤波器的Z域模型

2.2.3 数字压控振荡器的分析与设计

数字压控振荡器的 Z 域模型可以表示为：

$$H_{VCO}(Z) = \frac{Q_2(Z)}{U_c(Z)} = \frac{K_0}{Z-1} \quad (3)$$

其结构如图 7 所示。

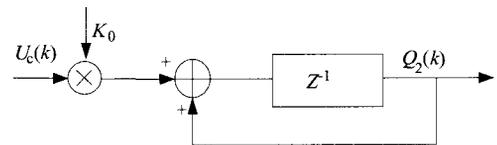


图7 数字压控振荡器的Z域模型

3 数字锁相环的性能分析

3.1 数字锁相环的传函分析

由图 3 数字锁相环的线性 Z 域模型可知，数字锁相环的开环传递函数为：

$$H_0(Z) = \frac{Q_2(Z)}{Q_1(Z)} = K \frac{F(Z)}{Z-1} \quad (4)$$

式中， $K = K_0 K_d$ 称为环路增益。

闭环传递函数为：

$$H_C(Z) = \frac{H_0(Z)}{1 + H_0(Z)} = \frac{KF(Z)}{Z-1 + KF(Z)} \quad (5)$$

误差传递函数为：

$$H_c(z) = \frac{Q_c(z)}{Q_1(z)} = 1 - H_c(z) = \frac{Z-1}{Z-1+KF(Z)} \quad (6)$$

可知环路传递函数除了与 K 有关之外,还与环路滤波器的传递函数 $F(Z)$ 有关,选用不同的环路滤波器^[3],将会得到不同环路的实际传递函数。

3.2 数字锁相环的稳定性分析

由(5)式知数字锁相环闭环传递函数为:

$$H_c(Z) = \frac{KF(Z)}{Z-1+KF(Z)} = \frac{(K_1+K_2)Z-K_1}{Z^2+(K_1+K_2-2)Z+1-K_1} \quad (7)$$

式中, $K_1 = KK_p = K_0K_dK_p$

$K_2 = KK_1' = K_0K_dK_1'$

其特征方程为:

$$Z^2 + (K_1 + K_2 - 2)Z + 1 - K_1 = 0 \quad (8)$$

根据离散系统奈奎斯特判据,环路稳定性的充分必要条件是闭环传递函数的特征方程的特征根全部位于 Z 平面的单位圆内^[4],即:

$$\left| \frac{2-K_1-K_2 \pm \sqrt{(K_1+K_2-2)^2-4(1-K_1)}}{2} \right| < 1 \quad (9)$$

解得环路稳定条件:

$$\begin{cases} K_1 > 0 \\ K_2 > 0 \\ 2K_1 + K_2 < 4 \end{cases} \quad (10)$$

同时可得出:

$$\begin{cases} (K_1 + K_2)^2 > 4K_2 & \text{欠阻尼状态} \\ (K_1 + K_2)^2 = 4K_2 & \text{临界阻尼状态} \\ (K_1 + K_2)^2 < 4K_2 & \text{过阻尼状态} \end{cases} \quad (11)$$

4 DPLL 的软件实现

DSP 通过 A/D 转换获得相位误差值,通过设置 EVB 模块中的具体寄存器的值就可以实现一定频率的脉冲输出^[5]。图 8 为 DPLL 的软件流程图。

5 实验结果

根据上述理论分析和仿真,设计一台基于 DSP 控制的 30 kHz/4 kW 的高频感应实验电源,频率跟踪范围为 20 kHz 至 35 kHz。实验证明:当负载波动时,DPLL 能控制输出频率 f_c 快速地跟踪负载频率 f_0 的变化。图 9 为不同加热温度下负载参数变化时,输出电压电流的波形。其中图 9(a)为负载在室温状态时的输出电压和电流波形,图 9(b)为负载在居里点温度时的输出电压和电流波形(图 9 中方波为电压波形,正弦波为电流波形)。

6 结论

实验结果表明在 Z 域中对二阶数字锁相环分析和设计的正确性。同时证明采用基于 DSP 的数字锁相环对高频逆变电源输出频率的实时控制,可实现逆变器工作频率对负载谐振频率的同步跟踪,确保逆变器开关器件工作在零电压电流软开关状态,显著减小功率器件的开关损耗和提高装置效率,提高系统频率

调节的动态响应和稳定精度。

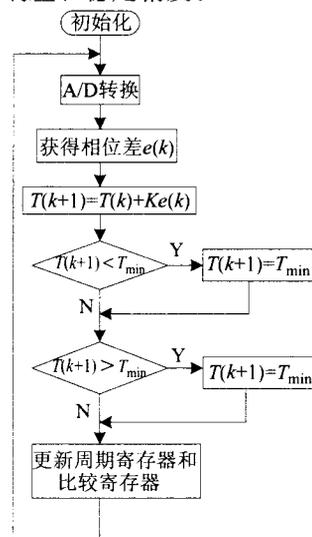


图 8 DPLL 软件流程图

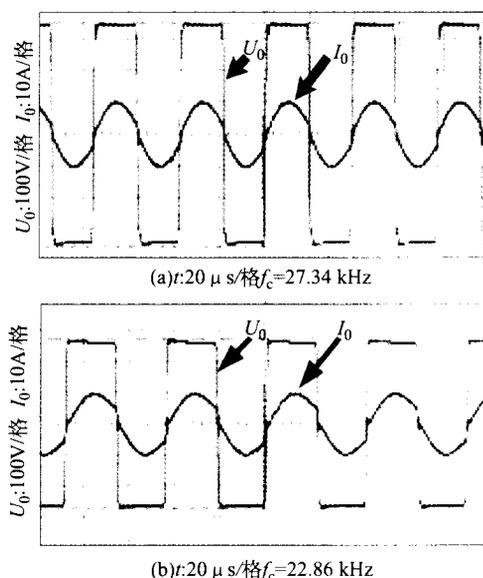


图 9 实验输出电压电流波形

参考文献:

- [1] 毛 鸿, 吴兆麟. 感应加热电源无相差频率跟踪控制电路[J]. 电力电子技术, 1998, 32(2): 69-72.
- [2] 惠 晶, 臧小惠. 基于 DPLL 的高频逆变电源建模与仿真[J]. 电力电子技术, 2005, 39(5): 115-117.
- [3] Roland E. Best Phase-Locked Loops Design, Simulation, and Applications(5th Ed.) [M]. Copyright, 2003 by The McGraw-Hill Companies, Inc.; 109-114.
- [4] Shayan Y R, Le-Ngoc T. All digital phase-locked loop: concepts, design and applications[C]. IEE. Proceedings, 1989, 136(1): 323-325.
- [5] Bayindir N S, Kukrer O, Yakup. M DSP-based PLL-controlled 50 - 100 kHz 20 kW high-frequency induction heating system for surface hardening and welding applications[J]. IEE Proc. -Electr. Power Appl., 2003, 150(3): 365-371.