

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.03.028

基于 DSP 的三相高频逆变器

李 维, 陈辉明 *

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对三相串联谐振负载由于参数的差异而导致谐振频率出现差异甚至相差比较大时, 系统难以有效地跟踪谐振频率, 电源可靠性降低等问题, 提出了一种三相高频逆变器简单可靠的解决方案。采用数字信号处理器(DSP)TMS320F28035 作为核心控制芯片, 采用双环结构控制方式, 利用电流外环实现了输出电流的有效调节, 利用数字锁相环(DPLL)对逆变器输出频率进行了实时控制, 实现了逆变器工作频率对负载谐振频率的有效跟踪。为了克服系统进入容性工作状态的问题, 增加了限相环节, 使逆变器工作在感性状态, 从而实现了 IGBT 的零电流开通以及二极管自然换流, 降低了开关损耗, 提高了电源的可靠性。理论分析与实验结果表明, 该方案实现简单、控制稳定、工作可靠, 为相关的系统研究打下了良好的基础。

关键词: 高频逆变; 数字信号处理器; 串联谐振; 数字控制; 三相逆变器

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)03-0397-03

Three-phase high-frequency inverter based on DSP

LI Wei, CHEN Hui-ming

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to track the load resonance frequency and system reliability is reduced due to the large difference between three-phase load because of parameter difference, a three-phase high-frequency inverter solution was proposed. The digital signal processor (DSP) TMS320F28035 was applied as the core control chip and the control strategy used the double-loop mode, including the current-loop which could effectively regulate the output current and the phase-loop which could adjust the output frequency of the inverter to achieve the effective load resonant frequency tracking. In order to overcome the problem of the system working into the capacitive state, a phase-limit loop was added, making the inverter work in inductive state, achieving the IGBT zero current switching and diode naturally current exchange to reduce switching losses, and also improving the reliability of power supply. The experimental results indicate that the scheme is simple and stable, which laying a good foundation of the related system research.

Key words: high-frequency inverter; digital signal processor(DSP); series-resonant; digital control; three-phase inverter

0 引言

随着电力电子技术的不断发展与进步, 对电源的输出频率、工作可靠性和效率等方面的要求进一步提高^[1]。在高频逆变器工作过程中, 为了改善电源质量、提高电源效率, 常常使用串联谐振式的补偿方案, 使逆变器工作在功率因数等于或接近于 1 的谐振或准

谐振状态, 要求逆变器能自动跟踪负载的固有谐振频率^[2]。传统的锁相环通常采用集成芯片 CD4046, 但是以 CD4046 控制芯片为控制单元的系统存在着一定的不足^[3], PLL 电路可能会出现失锁的现象。

电磁抹拭(EMW)装置尚处于研发阶段, 本研究根据电磁抹拭的技术机理^[4], 提出三相高频逆变器的解决方案, 采用串联谐振式的补偿方式, 设计以数字信号

收稿日期: 2013-12-09

作者简介: 李维(1988-), 男, 湖北鄂州人, 主要从事高频逆变、感应加热方面的研究。E-mail: weilee0815@163.com

通信联系人: 陈辉明, 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: huiming@zju.edu.cn

处理器 TMS320F28035 为核心的闭环控制系统;同时通过实验样机的制作与实验,验证控制方案设计的正确性。

1 系统结构

本研究基于电磁抹拭装置而提出的三相高频逆变器结构图如图 1 所示^[5-8]。

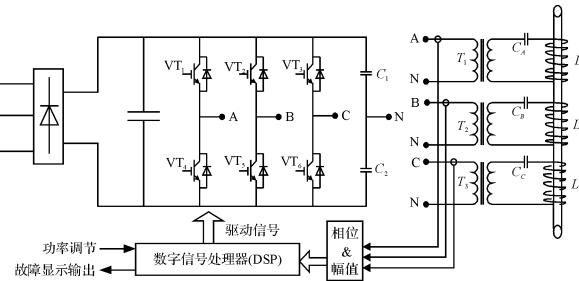


图 1 三相高频逆变器拓扑结构图

该系统主电路主要包括三相 AC/DC 不控整流桥,电压型三相逆变桥,负载高频匹配变压器 T ,谐振电容 C 以及三相负载感应线圈 L 。逆变器选用英飞凌公司的 IGBT 模块。控制电路主要包括数字信号处理器 DSP TMS320F28035 核心的控制电路,信号采集与调理电路以及 PC929 光耦隔离触发驱动电路。

2 控制系统分析与设计

高频逆变器工作在容性状态时,特别是在开关管大电流关断的情况下,二极管的反向恢复会比较严重,在桥臂间的引线电感上引起很高的 Ldi/dt ,导致开关管过压击穿,因此,这种情况会极大的降低电源的可靠性。而工作在感性状态时,二极管自然换流,IGBT 在零电流下开通,开通损耗较小^[9]。

基于以上情况,本研究设计的控制结构框图如图 2 所示。

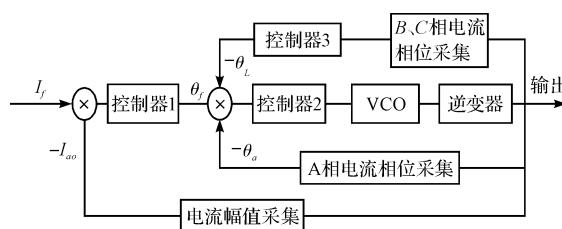


图 2 控制系统结构原理图

传递函数框图如图 3 所示。

逆变器主控制方式采用双环结构,电流环与内部数字锁相环。逆变器输出高频电流经过采样调理电路得到 A 相输出电流幅值 I_{ao} ,给定电流值 I_f 与 I_{ao} 的差得到输出电流误差信号,经过控制器 $G_{c1}(s)$,限幅输出

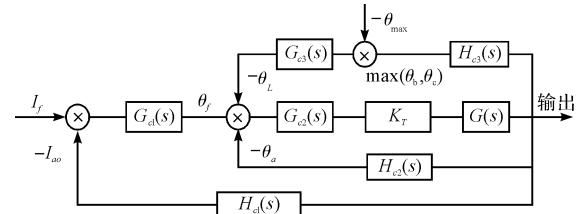


图 3 传递函数框图

作为相位内环的相位给定值 θ_f 。内部锁相环采用平均值锁相方式,即将输出电压相位脉冲信号移相 90°,与输出电流脉冲信号经过异或门输出,经滤波之后得到相位信号 θ_a , θ_f 与 θ_a 的差得到相位误差信号,经过控制器 $G_{c2}(s)$,限幅输出给压控振荡器(VCO),输出脉冲驱动信号。

为了使三相都工作在感性状态,本研究在双环的基础上添加了一个限相环。限相环的工作原理如下:随着逆变器输出频率的降低,输出电流增加,当任何一相的相位信号即将进入容性状态或超出了限相值 θ_{max} 时,限相环输出 θ_L ,使逆变器的输出频率增加,直到电路达到新的平衡,从而有效地防止逆变器进入容性状态。

电路正常工作过程如下:电路启动时,系统工作在最大频率,逆变器输出三相电压,电路几乎工作在全感性状态,此时输出电流很小。当增大给定电流参考并超过输出电流幅值时,经过双环作用,使系统的输出频率降低,输出电流增大,直到电路任何一相工作在谐振或准谐振状态,此时输出电流达到最大值;反过来,当给定电流参考减小并低于输出电流幅值时,系统的输出频率增加,使输出电流减小,直到输出频率为系统固有输出频率最大值,此时电流达到最小值。

2.1 控制器设计与数字化

本研究的控制器设计采用 PI 控制器,为了在 DSP 中实现该算法,本研究采取双线性变换^[10]对补偿器进行离散化。对于 PI 控制器,有:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (1)$$

离散化方程:

$$s = \frac{2}{T} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),有:

$$G_c(z) = \frac{2K_p + K_I T + (K_I T - 2K_p)z^{-1}}{2(1 - z^{-1})} \quad (3)$$

转化为差分形式有:

$$\begin{aligned} u(k+1) &= u(k) + \left(\frac{1}{2}T_s K_I + K_p \right) e(k+1) + \\ &\quad \left(\frac{1}{2}T_s K_I - K_p \right) e(k) \end{aligned} \quad (4)$$

在该设计中控制器参数如下:

$$G_{c1}(s) = 0.1 + 10/s;$$

$$G_{c2}(s) = 0.05 + 50/s;$$

$$G_{c3}(s) = 50/s。$$

2.2 软件设计

系统利用 TMS320F28035 中的 EPWM 模块产生 6 路 IGBT 驱动信号,三相驱动信号互差 120° ,由死区控制寄存器实现死区控制。系统主程序流程图如图 4 所示。

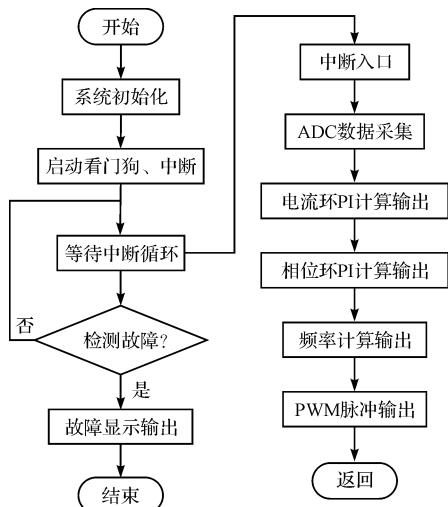


图 4 程序流程图

3 实验及结果

本研究根据如图 1 所示的结构设计并制作了一台实验样机,部分参数如下:输入电压为三相交流电 220 V,额定输出功率 10 kW,系统谐振工作频率为 33 kHz。逆变器输出电压、电流波形如图 5 所示。

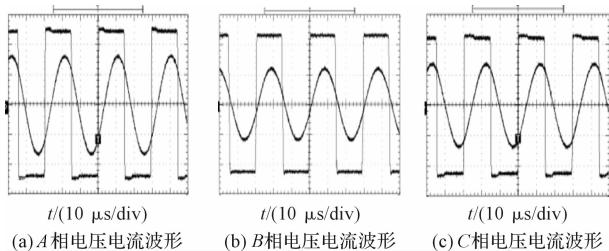


图 5 输出电压电流波形

从图 5 中可以看出,当三相负载不平衡时,通过限相环的作用,当 B 相达到准谐振状态,即 B 相相位被锁定在限相值,系统的谐振频率不再降低,A、C 相工作在感性状态,此时 IGBT 零电流开通。

4 结束语

本研究设计并制作了一台三相高频逆变器,根据串联谐振式负载的特性,提出了采用 DSP 作为核心控制芯片的数字控制方案,并详细给出了其控制策略。

理论研究与实验结果表明,该控制策略实现简单,能有效地跟踪负载的谐振频率,并且实现开关管的零电流开通;系统工作稳定可靠,能有效调节逆变器的输出功率,是一种比较实用的解决方案。

该方案可以为相关的系统研究提供参考。

参考文献(References):

- [1] CHEN M P, CHEN J K R, MASATOSHI N, et al. Surge analysis of induction heating power supply with PLL [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2001, 16(5): 702-709.
- [2] 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.
- [3] OKUNO A, KAWANOH, SUN J, et al. Feasible development of soft-switched SIT inverter with load-adaptive frequency-tracking control scheme for induction heating [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1998, 34(4):718.
- [4] 沈淦荣,杨逢瑜,徐志茹,等.管材热浸镀锌磁场力抹锌的技术机理[J].甘肃科学学报,2011,23(1):100-102.
- [5] 王 英,陈辉明,张仲超.感应加热谐振电路新拓扑模型研究[J].浙江大学学报:工学版,2005,39(11):1807-1810.
- [6] BAYTNDTR 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 Proceedings Electric Power Applications*, 2003, 150(5):365-371.
- [7] 林渭勋.现代电力电子电路[M].浙江大学出版社,2002.
- [8] 吴兆麟,袁俊国,于 非.高频感应加热装置的负载匹配方法[J].电力电子技术,1999,33(4):29-32.
- [9] AHMED N. High frequency soft switching AC conversion circuit with dual mode PWM/PDM control strategy for high power IH applications[J]. *IEEE Transactions on Industry Electronics*, 2011, 58(4):1440-1448.
- [10] 方 斌.控制系统中的双线性变换研究[J].电子科技大学学报,2004,31(2):192-195.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

李维,陈辉明.基于 DSP 的三相高频逆变器[J].机电工程,2014,31(3):397-399.

LI Wei, CHEN Hui-ming. Three-phase high-frequency inverter based on DSP[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(3):397-399.