

基于小电流检测的交-交实时连续变频的研究<sup>\*</sup>

杜庆楠 王靖威

(河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000)

**摘 要:** 为实现交-交变频器的实时连续变频,在深入研究了交-交变频原理、余弦交点法近似算法原理和双变量控制原理的基础上,提出了通过小电流检测来实现交-交实时连续变频的控制策略。该策略通过小电流检测来判断换流片段和换流时刻,依据余弦交点法近似算法在线计算触发时刻。为验证该控制策略的可行性,搭建了以STM32F103ZET为主控芯片的小电流检测交-交变频调速系统实验平台,并结合双变量原理、余弦交点法近似算法和小电流检测换流策略编写程序,进行实验。实验结果表明该策略有较好的控制效果。

**关键词:** 双变量原理;余弦交点法;连续变频;小电流检测

**中图分类号:** TM932    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 470

## Research on real-time continuous frequency control of AC-AC converter based on low current detection

Du Qingnan Wang Jingwei

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** In order to realize real-time continuous variable frequency of AC-AC converter, further studied the principle of AC-AC frequency conversion, approximation of cosine wave crossing and the principle of double variable, then proposed the strategy research on real-time continuous frequency control of AC-AC converter based on low current detection. This strategy used low current detection to judge current commutation segment and moment, calculated trigger point at point online based on approximation of cosine wave crossing. To verify the feasibility of this control strategy, set up the AC-AC converter speed control system experimental platform based on stm32f103zet, and wrote the program based on the principle of double variable, approximation of cosine wave crossing and the strategy of low current detection. Experimental results showed that the strategy has better control performance.

**Keywords:** principle of double variable; cosine wave crossing; continuous variable frequency; low current detection

## 1 引 言

交-交变频的原理是在不同时刻截取特定的输入电源电压片段以逼近基准波。为了使交-交变频器的输出电压接近正弦波,常用的调制方法是余弦交点法。余弦交点法求解复杂,为便于微机计算,目前往往采用直线方程代替三角方程的余弦交点法近似算法<sup>[1-2]</sup>。

近年来交-交变频相控理论有了新的进展,梁京等人<sup>[3]</sup>提出了交-交变频器双变量相控理论,即在单变量( $\alpha$ 角)控制的基础上,添加了第二个控制变量——脉冲宽度( $\beta$ ),也就是控制触发信号的后沿。基于双变量理论的相控变流器及变频器可以实现系统的自然无环流控制,但这是建立在对系统状况的准确判断,并且对系统换流片段准确设定的

基础上。文献[1-2]中,通过对余弦交点法线性化近似,实现了在线实时计算触发点时间常数,并且能够在线实时的改变输出电压的频率和幅值,但这是在事先设定好换流片段基础上实现的。随着负载和频率的变化,系统的换流片段会发生变化,因此系统换流片段的准确设定,是实现交-交实时连续变频的基础。

为了准确的判断并设定系统的换流片段,设计了基于电压比较器 LM339 的小电流检测电路,通过检测到的小电流信号来确定换流片段。另外,结合河南理工大学电机调速实验室的现有设备,以意法半导体公司推出的基于 ARM Cortex-M3 内核 32 位处理器 STM32F103ZET 为主控芯片<sup>[4-6]</sup>,搭建了基于小电流检测的交-交变频调速系统实验平台<sup>[7-16]</sup>。通过实验,验证其实际的控制效果。

收稿日期:2015-10

<sup>\*</sup> 基金项目:2013 年河南省科技攻关项目(132102210126)资助

## 2 原理与设计

### 2.1 小电流检测

所谓小电流是指大小在零附近一个很小范围内的电流信号。这里选择 $\pm 0.1$  mA,当电流在这个范围内时,按照双

变量控制原理同时触发与正在导通的晶闸管反并联的晶闸管,能够实现电流的自然换流。小电流检测电路是整个策略实现的硬件基础,只有当小电流检测环节精确无误的检测到小电流信号,并且及时的传输到系统 MCU,系统才能够准确判断换流时刻和换流片段,并触发相应的控制算法。

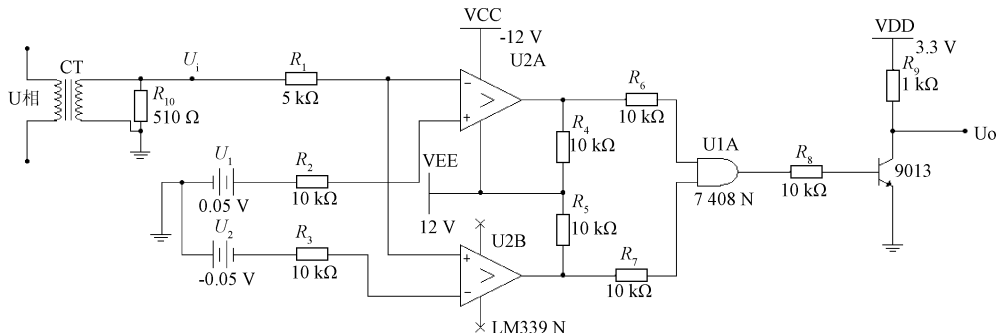


图 1 小电流检测电路原理

为了精确的检测到小电流信号,设计了基于 LM339 的双限过零比较电路,以检测变频器输出电流的小电流信号。以三相中的 U 相为例,小电流检测电路的原理图如图 1 所示:将霍尔电流互感器得到的电流信号转化为电压信号  $U_i$  后,通过由 LM339 组成的双限比较器,经过 7408 与门,再经过三极管后得到信号  $U_o$ ,发送给主控芯片 STM32F103ZET,系统微处理器通过检测  $U_o$  信号的下降沿,从而实现小电流信号的检测。从图中可以看出,当  $U_i$  在 $\pm 0.05$  V 范围内时, $U_o$  为低电平,其他时刻  $U_o$  为高电平。

### 2.2 换流策略

结合双变量控制原理,基于小电流检测的换流策略如下:当系统检测到小电流信号后,同时触发输入电源对应相上反并联的 2 只晶闸管,使电流换流在输入电源同一相上 2 只反并联的晶闸管上实现,并计算出下一个要导通的晶闸管管号和触发时刻。以图 2 为例来分析基于小电流检测的换流策略:以 U 相为例,如图所示在  $O_k$  处触发的是 A 相反组晶闸管,若没有检测到小电流信号,那么下一个时刻在  $O_{k+1}$  处触发 B 相反组晶闸管;若在  $O'_{k+1}$  处检测到小电流信号,则在  $O'_{k+1}$  处同时给 A 相正反组晶闸管触发脉冲,并计算出下一个要导通的 B 相正组晶闸管触发时刻  $O_{k+2}$ ,当 A 相反组晶闸管电流过零自然关断后,A 相正组晶闸管导通,从而实现了系统的自然无环流控制。

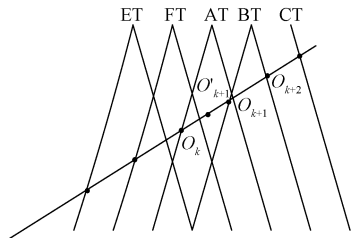


图 2 电流换流分析

## 3 实 验

为验证小电流检测换流策略的实验效果,以意法半导体 STM32F103ZET 为主控芯片,搭建了基于小电流检测的交-交变频调速系统实验平台,并选用型号为 1LA7113-4AA60-Z 的西门子三相鼠笼异步电机为实验控制对象。电机名牌参数如下:额定电压为 400 V,额定电流 8.2 A,额定转速  $1440 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,额定功率 4 kW。如图 3 和 4 所示分别为基于小电流检测的交-交变频调速系统实验平台实物图和系统主程序流程图。

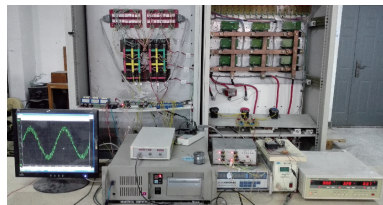


图 3 交-交变频调速系统实验平台实物

如图 5 所示为变频器输出 10 Hz 时小电流信号。图中蓝色曲线为变频器 U 相输出电流波形,黄色曲线为 U 相小电流信号。从图中可以看出在电流过零附近一个很小范围内小电流信号为低电平,其它时刻为高电平,与最初小电流检测设计保持一致。

如图 6 和 7 所示,为变频器设定频率 10 Hz 时,有小电流检测和无小电流检测环节变频器输出端电压和电流波形。对比图 8 和 9 可以看出,相比于没有小电流检测环节,有小电流检测环节的变频器输出电流和电压波形,均具有较好的正弦度和对称性,而且电流自然过零,无环流、无死区、无滞后。

经过分析可以得出:相比于有小电流检测,无小电流检测环节交交变频器输出端电压和电流波形的好坏,完全

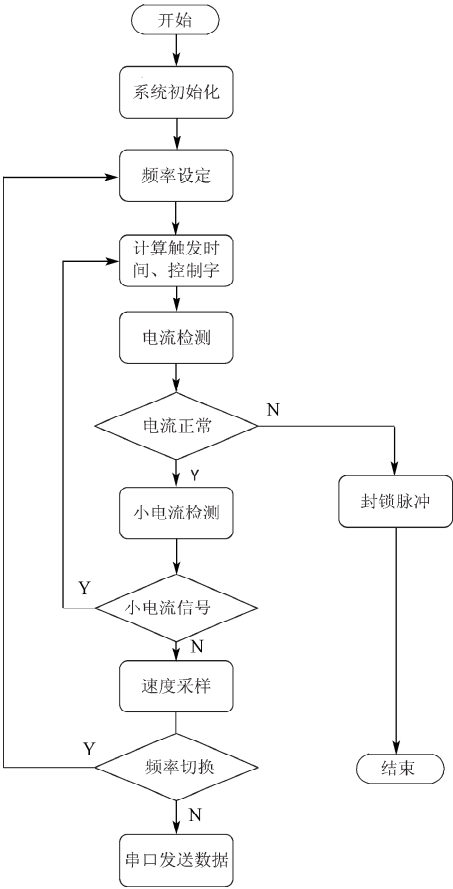


图 4 系统主程序流程

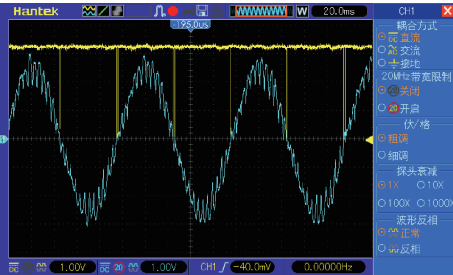


图 5 小电流检测信号

依赖于事先设定的换流片段精确与否,因此在负载变化情况下保证电流的无死区、无滞后自然过零。而基于小电流检测环节的交交变频器,通过小电流检测来确定换流片段,无论负载如何变化,都能保证变频器输出电流的无环流、无死区运行。

为验证基于小电流检测的交-交变频控制策略连续变频的能力,编写实验程序,使变频器输出频率以 0.1 Hz 的级差从 10 Hz 连续变化到 6.5 Hz。如图 8 所示,为电机实际运行时的转速波形,从图中可以看出电机转速从  $290\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  连续变化的  $191\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,且震荡较小,说明该策略具有较好的连续变频的能力。

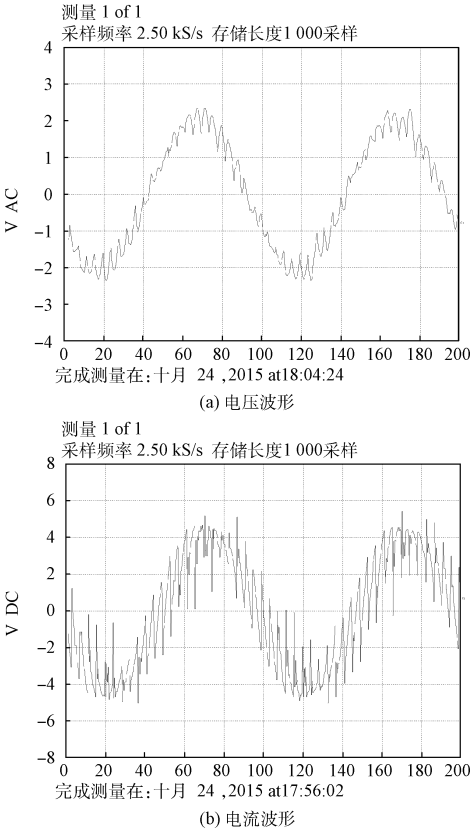


图 6 有小电流检测输出电压和电流波形

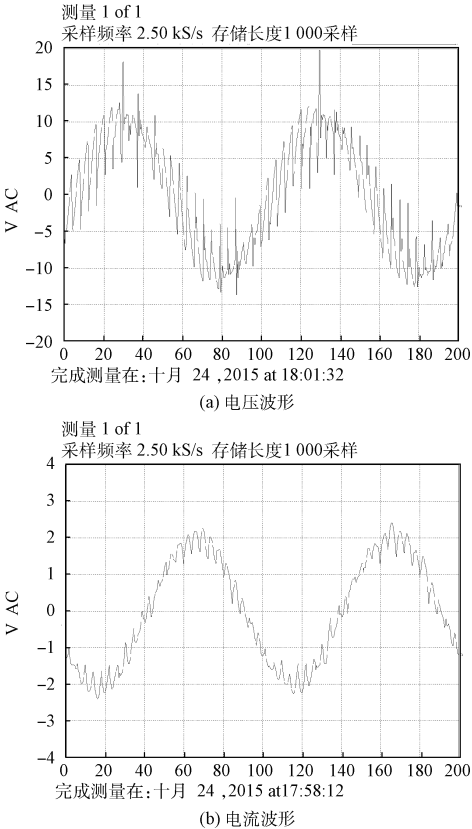


图 7 无小电流检测输出电压和电流波形

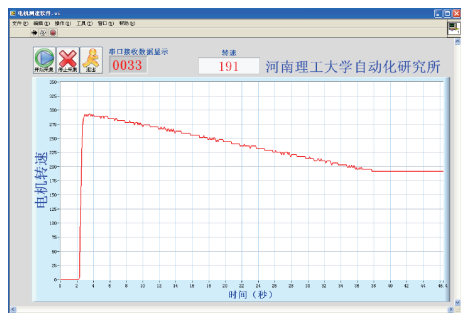


图 8 10~6.5 Hz 连续变频转速波形

## 4 结 论

在深入了解交-交变频和双变量控制原理的基础上,提出了一种通过小电流检测来确定交-交变频器换流片段的控制策略,并搭建了以 STM32F103ZET 为主控芯片的小电流检测交-交变频调速系统实验平台。实验结果表明,运用该策略的交-交变频器输出电压和电流波形较好,不仅能够实现系统的自然无环流、无死区运行,而且能够实现在线实时连续变频,具有较好的调速性能。可以推广到实际的交交变频调速系统中。

## 参考文献

- [1] 陈鑫,杜庆楠.改进的交-交变频器脉冲触发控制策略研究[J].煤炭机电,2014(3):34-41.
- [2] 杜庆楠,田力,刘霄.基于双变量的交交变频器实时变频策略的研究[J].河南理工大学学报:自然科学版,2014,33(2):197-201.
- [3] 梁京,杜庆楠.转子侧双变量交-交变频调速方法研究[J].煤炭机械,2013,34(4):66-68.
- [4] 荣少巍.基于 STM32 的实收实发超声波检测系统研究[J].国外电子测量技术,2014,33(9):54-58.
- [5] 袁强,何乐生.一种基于 AMI 系统的无线三相智能电表的设计[J].电子测量与仪器学报,2013,27(5):473-478.
- [6] 解伟.基于 STM32 的自动气象站控制模块设计[J].电子测量技术,2014,37(7):107-120.
- [7] 刘华林.双变量六脉波交-交变频器高频调速研究[J].电力电子技术,2011,45(11):112-114.
- [8] BHOWMIK P K, YELLAPRAGADA S, MANJREKAR M. Dynamic analysis and controller design for a center-point-clamped ac-ac converter[J]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2015:535-542.
- [9] RUTER M, OBERSCHELP W, SCHRODER G. Parameter adaptation of a sensorless controlled induction machine by measurement of the? slipfrequency [J]. IEEE Conference Publications, 2011:1-9.
- [10] KITCHAROENWAT S, KONGHIRUN M, SANGSWANG A. A controlled current AC-AC converter for circuit breaker testing [J]. Electrical Machines and Systems, 2012, 1-6.
- [11] 冯高明,李玉东.矿用机车变频调速驱动装置的研制[J].河南理工大学学报,2012,31(6):712-716.
- [12] 冯高明,李玉东,杜庆楠.基于双变量变频器的超同步串级调速系统起动过程研究[J].河南理工大学学报,2013,32(4):458-462.
- [13] 袁建州,艾朝平.基于零磁通原理的小电流传感器设计[J].电子测量技术,2011,34(2):22-24.
- [14] 文玉梅,孙登峰.自全式无线霍尔电流传感器[J].仪器仪表学报,2014,35(8):1700-1707.
- [15] 彭建飞,王树锦,徐丽荣,等.基于 DSP 的单相无环流交交变频控制系统研制[J].电力电子技术,2009,43(5):54-70.
- [16] 王纳林,张望.变频调速控制系统的设计与安装[J].机电工程,2012,29(8):958-960.

## 作者简介

杜庆楠,教授,研究方向电力电子与电气传动。  
E-mail:1571402403@qq.com