

## 基于滞环控制的电力变换器设计

赵影, 张敏, 吴凤英

(天津理工大学天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300191)

**摘要:** 由于现代电力电子技术的发展, 各种非线性器件的广泛应用, 使得畸变电流对电网的污染越来越严重。针对电力变换器造成电网谐波污染问题, 在理解变换器的电路、控制等基本原理的基础上, 根据电流跟踪控制原理, 以高性能的 DSP 芯片作为电力变换器的控制器, 设计了电流滞环控制系统, 对变换器输入电流进行了实时的控制并进行了系统仿真和系统测试, 实现了系统的高功率因数和输入电流的正弦化。

**关键词:** 畸变电流; 电流跟踪控制; 高功率因数; 变换器; DSP

## Design of power converter based on hysteresis control

ZHAO Ying, ZHANG Min, WU Feng-ying

(Tianjin Complex System Control Theory and Application Key Laboratory, Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** As the development of advanced power electronics, various nonlinearity, components widely used, which makes the current distortion large. To solve the harmonic pollution which is brought by electric power converter, based on the principle of converter circuit, control theory and electric current tracking method, this paper designs this controller with high-performance DSP chip. This controller has current instantaneous hysteresis double closed circuit system to control input current real-time. Simulation test by prototype and its system testing are made. This control system can improve the power factor and input sin current.

**Key words:** current distortion; electric current tracking control; high power factor; converter; DSP

中图分类号: TN86 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)16-0066-04

## 0 引言

随着电力电子技术的迅速发展, 极大地推动功率开关变换技术的研究和应用。电力变换器是应用功率开关变换技术制成的电力电子装置, 在多种领域广泛应用, 尤其是许多新能源只有通过电力变换器才能将电力逆变馈送到电网才得以使用。由于传统的相控变换器电路简单, 技术成熟, 价格低廉, 但在网侧功率因数低, 输入电流谐波含量高, 交流侧电网电压波形畸变等缺点, 其结果是向公共电网内注入了大量的电流谐波, 影响了电网的供电质量, 造成用户应用系统的损坏。故目前用户对提高电能质量的呼声也越来越高, 电流谐波的治理也越来越受到重视<sup>[1,2]</sup>, 所以有必要在理解变换器的电路、控制等基本原理的基础上, 探讨其控制方法, 设计高功率因数的变换器。目前这方面的研究除了探索新的电路拓扑结构外多集中在其控制策略的实用性研究方面。本文根据电流瞬时直接控制方法介绍一种

基于 DSP 控制, 降低对电网的影响的电力变换器, 并给出其试验仿真结果。

## 1 变换器工作原理与控制方式

## 1.1 电力变换器主电路拓扑结构

电力变换器装置其工程设计包括主电路、控制电路、电磁兼容等多方面的内容, 控制方式也有多种形式。变换器采用 IGBT 作为功率开关管, 具有较高的效率和可靠性。电力变换器主电路拓扑结构如图 1 所示。

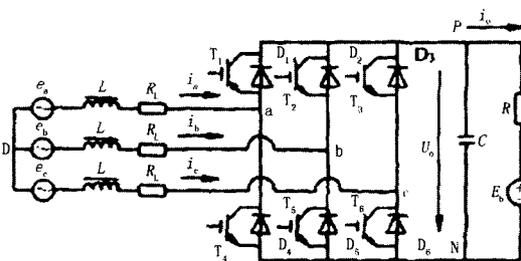


图 1 三相变流器主回路拓扑结构图

Fig.1 Main circuit topology structure of three phase converter

它是一个三相六开关电压型变流器, 图中  $e_a$ ,  $e_b$ ,  $e_c$  为三相交流电源,  $L$  为电抗器,  $R_L$  为电抗器内阻,  $T_1 \sim T_2$  为全控型开关器件, 电力电子变换器在工作时, 各开关器件轮流交替导通向负载提供电能。  $D_1 \sim D_2$  为开关器件的续流二极管,  $C$  为输出直流侧的滤波电容,  $R$  和  $E_b$  为负载。

## 1.2 电力变换器的控制策略

控制理论运用取决于被控对象和控制效果的要求, 为了使电力电子变换系统获得较高的稳态精度和动态性能, 必须采用相应的控制规律或控制策略。三相电力变换器系统是带有开关函数的、强耦合的、非线性时变系统, 为了使系统有较好的实时性采用电流直接控制。在这种控制方法中, 通过运算求出交流电流指令值, 再引入交流电流反馈, 通过对交流电流的直接控制使其跟踪指令电流值。常用的跟踪方法为电流滞环瞬时比较控制<sup>[3]</sup>。

电流滞环瞬时比较控制是一类典型的非线性控制律, 具有受控对象响应速度快、鲁棒性好等固有特点。电流滞环瞬时比较控制不依赖于变流器系统的数学模型、系统参数, 从而也不需要系统模型进行近似和简化处理。电流滞环瞬时比较控制可以控制电流很好地跟踪输入电压波形, 功率因数高。由指令电流信号产生电流上限与下限值, 构成电流滞环带。采用电流滞环瞬时比较控制如图 2 所示。

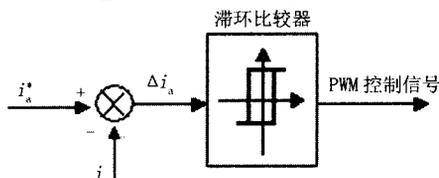


图 2 电流滞环瞬时比较方式原理图

Fig.2 Current hysteresis instantaneous comparison

图 2 中  $i_a^*$  为指令电流信号;  $i_a$  为实际电流信号;  $\Delta i_a$  为两者的差值。将实际电流信号  $i_a$  与指令电流信号  $i_a^*$  进行比较, 如果比较结果  $\Delta i_a$  超出滞环宽度, 则改变功率元件的开关状态, 从而改变实际电流的大小, 如实际电流达到指令电流下限值时, 则通过改变变流器的开关状态使之增大。当实际电流达到指令电流上限值时则通过改变变流器的开关状态使之减少, 使实际电流始终限定在滞环宽度以内, 使其快速准确的跟踪指令电流。并将偏差限制在一定的范围内。

可以看出, 存在一个稳定的极限环, 不论系统初始状态如何, 经过一次开关转换过程, 其轨迹都会收敛于极限环, 因此, 滞环控制具有非常好的稳

定性和快速性。滞环控制系统的开关周期同滞环宽度直接相关, 并同系统主电路参数  $L$ 、 $C$ 、 $R$  及输入、输出电压密切相关。

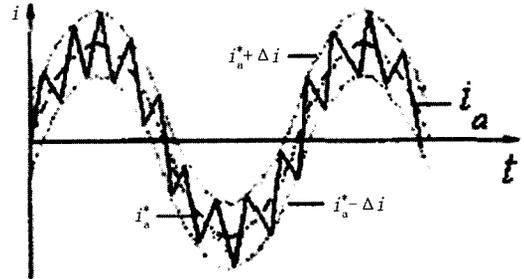


图 3 电流滞环瞬时比较控制原理图

Fig.3 Current hysteresis instantaneous comparison control

## 1.3 电力变换器双闭环控制构造

系统采用双闭环控制方式其结构如图 4 所示。

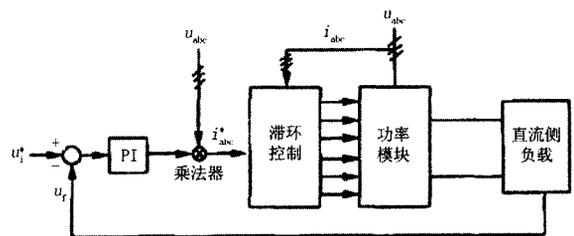


图 4 系统的双闭环控制结构

Fig.4 Systematic closed cycle structure

基于电流滞环瞬时控制思想构造的双闭环系统, 内环为交流电流控制环, 外环为直流电压控制环。给定电流为正弦波, 因为实际电流跟踪给定电流, 故实际电流也为正弦波。电压环将实际电压信号  $U_f$  与给定电压信号  $U_i$  进行比较, 其误差信号经 PI 调节器后与电源电压信号  $U_{abc}$  相乘就得到三相交流电流的正弦指令信号  $i_{abc}^*$ ,  $i_{abc}^*$  与对应的电源电压同相位。该电流指令信号  $i_{abc}^*$  与采集的实际电流信号  $i_{abc}$  比较后, 通过滞环来决定各功率开关的时序, 对各功率开关器件进行控制, 实现实际交流电流快速准确地跟踪指令电流, 其跟踪误差在由滞环宽度所决定的范围内, 保证直流端电压恒定, 交流输入电流正弦且为单位输入功率因数。

## 2 基于 DSP 控制的变流器测试系统构成

由于电流直接控制变流器是一种新型变流系统, 其主要功能是维持直流端电压恒定, 交流输入电流正弦且为单位输入功率因数, 在设计中, 采用了电流滞环瞬时比较方式控制思想实现对电流的迅速调节, 以高性能的 DSP 芯片为全数字控制系统的

核心。系统结构如图 5 所示。

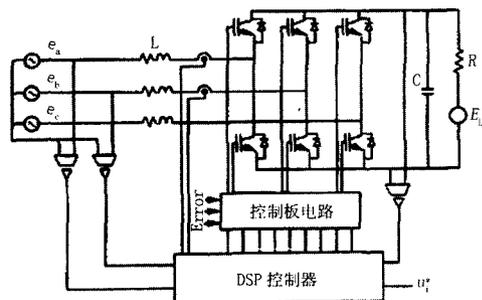


图 5 基于 DSP 控制的变换器系统结构图

Fig. 5 Converter system structure based on DSP control

系统各部分的功能主要为：

### 2.1 DSP 控制器

控制系统采用数字处理芯片和数字控制技术，DSP 控制器是电力变换器的核心部分，具有很高的实时性和良好的可编程控制功能，主要任务是采集电流信号，完成控制算法发出 PWM 驱动信号同时利用其外设为系统平台提供专用接口。系统采用 TI 公司的 TMS320LF2407A 处理器作为控制器的核心器件，由于其具有高速的运算能力，较高的采样精度，外配置性能和功能较强，能胜任实时性要求高的滞环控制任务。

### 2.2 功率模块与驱动电路

主电路是三相电压 AC/DC 变流器。功率模块选用 SKM75GB063D IGBT 模块，加上缓冲电路、驱动电路与控制电路构成三相变流器装置。驱动电路由 SKHI22 控制板构成，可输出六路控制信号驱动 IGBT，其输入端接有可隔离电压光电耦合器，使控制电路与驱动电路隔离，同时，该电路具有桥臂互锁功能和桥臂直通错误信号检测功能，防止同一桥臂的两个 IGBT 直接导通造成短路故障。并且根据 IGBT 本身的特性，设计了相应的保护电路。

### 2.3 电抗器

系统的关键元件，具有抑制电流变化速度的作用，它的取值大小直接影响到系统的控制性能

### 2.4 测试系统其它器件表

为完成系统的测试项目还配备了其它器件如表 1 所示。

## 3 系统软件与仿真和测试波形

### 3.1 系统的软件功能

根据电压型电力变换器的电流滞环瞬时控制方法，采用数字式 PI 调节器的 DSP 控制实现。将系统软件划分为以下几个功能模块：系统初始化、信号采集、控制算法、控制信号输出和桥臂的直通短路错误信号检测，具有很强的移植性。软件流程如图 6

所示。

表 1 测试系统其它器件表

Tab.1 Other component of testing system

1	自动开关
2	缺相保护继电器
3	接触器
4	按钮
5	直流电压表
6	直流电流表
7	交流电流表
8	交流电压表
9	信号灯
10	电流互感器
11	转换开关
12	分流器
13	开关电源
14	智能交流电压传感器
15	智能交流电流传感器
16	智能直流电流互感器
17	智能直流传感器
18	电容
19	示波器

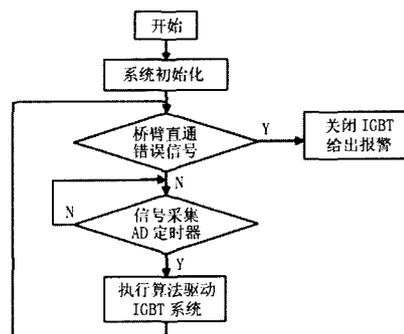


图 6 软件流程

Fig.6 Software flow chart

### 3.2 系统的仿真与分析

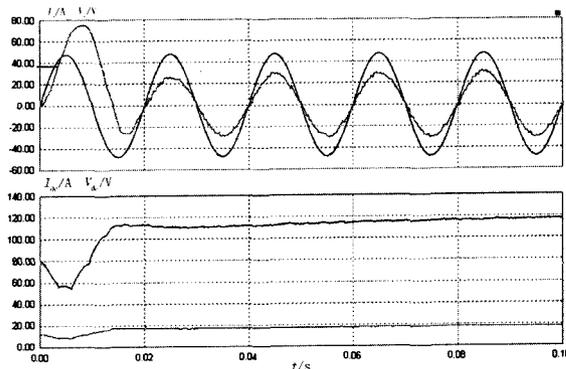


图 7 仿真结果

Fig.7 Simulation result

为了验证系统分析的正确性, 根据滞环电流控制变换器系统的硬件原理和软件编程, 用 PSIM 对整个系统进行仿真实验。

### 3.3 系统测试波形

采用电流跟随滞环控制策略, 经过系统测试的电压、电流波形如图 8 所示。

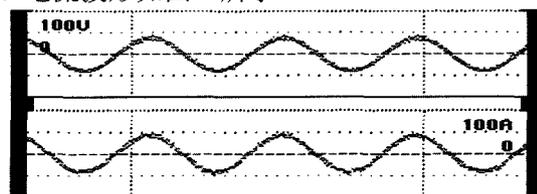


图 8 测试结果  
Fig.8 Test result

通过对变换器系统进行的仿真和系统测试, 由测试与仿真结果可以看出系统具有较高的实时性, 能稳定工作在单位功率因数状态, 即输入的电流波形可以看作正弦波, 输入电流跟随电压按照正弦规律变化, 可以达到同相位, 做到功率因数等于 1。

系统的参数 (主要是电感量) 的变化是控制策略实现与否的关键, 电感抑制滞环策略中的电流增加和减小, 对于控制思想的实现有着很大的作用, 对变换器系统的动态特性有显著的影响。这对主电路电抗器的参数变化进行了大量的试验, 电感量不同时, 电流的快速跟踪性不同, 电流谐波分量会有变化。此参数设计与变换器的控制频率有关, 也是影响系统控制效果的关键之一。

采用瞬时比较电流跟踪方式, 滞环宽度  $H$  对电流的跟踪性能有较大的影响: 当  $H$  较大时其跟踪误差大, 跟踪能力差, 对主电路中电力电子器件的开关频率要求较低; 当  $H$  较小时电流跟踪误差小, 跟踪能力强, 但对主电路中电力电子器件的开关频率要求较高。

## 4 结论

针对电流滞环比较控制思想和仿真试验, 在实验室构造了由 SKM75GB063D IGBT 模块加上缓冲电路、SKHI22 控制板与 TMS320LF2407A 芯片等器件组成的三相变流器系统测试环境, 采用智能交流电压传感器 VBT300V3NND1B1 和智能交流电流传感器 BLYL200-S7/SP4 等作为检测装置, 通过试验验证了仿真结果。使变流器工作在单位功率因数状态下工作完成整流。当直流侧接反电动势负载具备逆变条

件时, 系统能实现逆变, 即: 直流侧能量向交流侧流动, 并且功率因数为-1, 实现能量的逆向流动。

### 参考文献

- [1] 林海雪, 孙树勤. 电力网中的谐波 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.  
LIN Hai-xue, SUN Shu-qin. Harmonic in Power Network [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [2] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.  
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Power Compensates Harmonic Restraint and Idle Work [M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [3] 邢岩, 蔡宣三. 高频功率开关变换技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.  
XING Yan, CAI Xuan-san. The High-frequency Power Switch Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [4] 张占松, 等. 开关电源的原理与设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1999.  
ZHANG Zhan-song, et al. Switch Power Principle and Design [M]. Beijing: Publishine House of Electronics Industry, 1999.
- [5] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.  
ZHANG Chong-wei, ZHANG Xing. PWM Rectifier and Controlling [M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [6] 刘和平, 王维俊, 江渝, 等. TMS320LF240x DSP C 语言开发应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.  
LIU He-ping, WANG Wei-jun, JIANG Yu, et al. TMS320LF240x DSP C Language Development [M]. Beijing: Beijing University of Aeronatics and Astronatics Press, 2002.
- [7] 杨旭, 等. 开关电源技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.  
YANG Xu, et al. Switch Power Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [8] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
XU De-hong. Electric Power Electron System Modeling and Control [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.

收稿日期: 2008-03-09; 修回日期: 2008-03-23

作者简介:

赵影 (1954-), 女, 副教授, 研究方向为运动控制技术、电力电子技术。E-mail: zy\_1954@126.com