

变频器应用与维护

李方园 编著

BIANPINQI
YINGYONG YU
WEIHU



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



变频器应用与维护

李方园 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书简明扼要地阐述了变频器的最基本原理、功能方式及其在工程实践中的应用。全书共分为六章,由浅入深地介绍了变频器的功能、原理、特性,重点介绍了变频器维护的基本知识及故障定位,变频器在泵、分离机械、造纸行业、冶金行业和纺织行业中的具体应用,并对生产工艺等变频器的应用背景进行了适当地介绍,以方便读者理解。

本书结构清晰,实例丰富且具有代表性,内容由浅入深,可供从事变频器代理和销售的人员、电气技术相关从业人员和高职高专相关专业的师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

变频器应用与维护/李方园编著. —北京:中国电力出版社, 2009

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8564 - 8

I. 变… II. 李… III. 变频器 - 基本知识 IV. TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 031172 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 6 月第一版 2009 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.25 印张 340 千字

印数 0001—3000 册 定价 25.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

因为学习，因为工作，所以从没脱离过写作。小时候为了完成作业而写；中学时为了考试而写，工作后为了工作而写，文体从记叙文、议论文、散文到论文，从挖空心地写到有感而发地写，从被迫到主动地写。写作丰富了我的成长经历，愉悦了我的心灵世界，拓宽了我的思维。我一直喜欢写议论文，因为对像我这样没有丰富词汇的人来说，也许是一种优势吧。加上我学的是工科，擅长逻辑思维，写起议论文来如鱼得水，每每以成功告终，成功的写作体验带给我的就是从此爱上了写作。

可是从议论文到论文的转变，这倒源于《变频器世界》的约稿函，那是2000年的事了。对着这样的约稿函，我却不知所措了，因为除了大学毕业论文，还真没有仔细斟酌过，好像跟我没有太多的关系。当忙碌了一天，沉浸在朦胧的夜色中，静了，周围静了，思绪也静了，看着这约稿函，就想坐定在电脑前写上几笔成功的变频器案例，让飞逝的每一天留下印痕；让记忆不再空白；让同样长度的人生拓展它的宽度。此时，感觉有“变频器应用”的语言也真好，此后，便一发不可收拾，如今数十篇的论文中，一半竟都是为《变频器世界》而写的。

而从变频器的应用论文到变频器书籍的整理，则是在中国电力出版社编辑的推荐下，两年内完成第一部书籍《变频器行业应用实践》，此后陆续有变频器的书籍整理出版。这期间，读者，变频器培训班的学员、网友，以及各个变频器厂商的技术人员都给我很大的鼓励，同时一直得到张永惠教授的指导，顿感欣慰！

本书是在国内变频器市场容量急剧扩增、变频节能改造如火如荼的情况下编写完成的。全书共分为六章。第一章是变频器概述部分，介绍了变频调速的原理、变频器的基本构造、变频器的功能方式以及特点；第二章主要介绍了变频器的设计原理，阐述了变频调速系统的基本特性，并从转速控制应用、PID控制应用、通信设计和变频控制柜的设计四个方面进行分类描述；第三章主要介绍了变频器的应用基础，从变频器在多传动系统中的基本应用、变频器在总线控制系统中的基本应用、变频PLC控制系统的工程应用和变频节能应用突出了基础的重要性；第四章主要介绍了变频器在泵、分离机械、造纸行业、冶金行业和纺织行业的具体应用案例，以翔实的资料给读者一个崭新的视野；第五章主要介绍了变频器维护的基本概念，结合过电压、过电流、过载、缺相和通信故障原因的阐述进行故障定位；最后，在第六章阐述了变频器的具体维护案例，内容包括艾默生变频器、西门子变频器、风光变频器等维护案例实践。

本书具有下列主要特点：①本书简明扼要地阐述了变频器的最基本原理和功能方式，并以此为前提结合实际工程案例，在案例中得到理论的验证；②结构清晰，以“变频器原理—变频器应用基础及实例—变频器维护基础及实例”为主线，由浅入深地介绍了变频器

应用案例和维护实践；③ 实践和工程案例突出，在变频器应用和维护中，侧重于将生产工艺等变频器应用背景进行了适当介绍，以方便用户理解。

本书在编写过程中，得到了西门子变频器、艾默生变频器、ABB 变频器、安川变频器、三垦变频器等厂家相关人员一如既往的帮助并提供了相当多的典型案例，分享了调试经验。同时，在编写中曾参考和引用了国内外许多专家、学者、工程技术人员最新发表的论文、著作等资料。此外，陈亚玲、叶明、陈贤富、沈阿宝、陈亚珠、李伟庄、章富科、方定桂、叶再赞、周琦、张文杰、韦奇奎、潘芝渭等参与了本书大量的资料整理、文字录入和校对工作，在此一并表示感谢。

限于作者水平，在写作过程中难免存在不足和错误，恳请广大读者批评、指正。变频器市场规模的逐日扩大，变频器产品的日渐丰富，变频器技术的异彩纷呈，这些都使得变频器的应用和维护案例更新速度加快，因此还请各位读者，如果有好的应用案例或者想更正书中需要商讨的任何细节，都请来信或来电，以本书搭建起变频器应用与维护的平台和基地，为提高变频传动的自动化水平做出贡献。

作者

2009 年 5 月

前言

第一章 变频器概述	1
第一节 变频器的构造与调速原理	7
第二节 变频器的功能与方式选择	20
第三节 变频器的特点与分类	27
第二章 变频器的设计原理	27
第一节 变频调速系统的基本特性	39
第二节 转速控制应用	48
第三节 PID 控制应用	58
第四节 通信设计	63
第五节 变频控制柜的设计	71
第三章 变频器应用基础	71
第一节 变频器在多传动系统中的基本应用	79
第二节 变频器在总线控制系统中的基本应用	87
第三节 变频 PLC 控制系统的工程应用	92
第四节 变频节能应用	98
第四章 变频器应用实例	98
第一节 泵的变频器应用	112
第二节 分离机械的变频器应用	125
第三节 造纸行业的变频器应用	134
第四节 变频器在纺织印染行业的应用	149
第五节 冶金行业的变频器应用	160
第五章 变频器维护基础	160
第一节 变频器维护的基本概念	170
第二节 过电压原因及故障定位	176
第三节 过电流原因及故障定位	181
第四节 过载原因及故障定位	184
第五节 缺相原因及故障定位	188
第六节 通信故障原因及故障定位	192
第六章 变频器维护实例	192
第一节 艾默生变频器维护实例	192

第二节	西门子变频器维护实例	200
第三节	风光变频器维护实例	205
第四节	变频器维护的经验总结	211
参考文献		222



变频器概述



第一节 变频器的构造与调速原理

一、变频器的调速原理

变频器是从上世纪中叶发展起来的一种交流调速设备,是为了解决传统的交流电动机调速困难、传统的交变速设备结构复杂且效率和可靠性均不尽人意的缺点而出现的。由于变频器可以使交流电动机的调速范围和调速性能均大幅度提升,因此变频调速的交流电动机逐渐代替直流电动机而出现在各种应用领域,甚至包括伺服控制领域。随着电力半导体的长足发展,变频器也随之不断进步。如今变频器已深入到我们的日常生活,随处可见。

交流变频调速器的主要调速对象是交流感应电动机,变频器对交流电动机实施变频调速的过程中,其输出电压和输出频率的变化必须遵守一定的规则,这就是我们通常所说的变频变压(VVVF)的基本原则。

1. 变频变压的基本原则

由电机学理论可知,三相感应电动机的转速为

$$n = \frac{60f(1-s)}{p} \quad (1-1)$$

式中 n ——电动机的转速;

f ——输入交流电源的频率;

p ——电动机的极对数;

s ——异步电动机的转差率。

通过式(1-1)可知,改变交流电动机转速的方法有三种,即变频调速、变极调速和变转差率调速。其中,变转差率调速主要包括调压调速、串级调速和滑差电动机调速,在变频调速器未问世以前,它是主要的调速手段。但由于变转差率调速范围窄、效率低,对电网污染较大,不能满足交流调速应用的广泛需求。20世纪70年代以后,随着电力电子技术的发展,特别是高性能大功率器件IGBT的产品化,变频调速器在体积、性能及成本方面取得了飞跃的发展,并逐渐替代变转差率调速而转为工业实用化。

交流电动机是通过内部的旋转磁场来传递能量的,为了保证交流电动机能量传递的效

率, 必须保持气隙磁通量为恒定值。如果磁通量太小, 则没有充分发挥电动机的能力, 导致出力不足。反之, 如果磁通量太大, 铁心过度饱和, 会导致励磁电流过大, 严重时会使绕组过热而损坏电动机。因此, 保持气隙磁通量的值恒定不变是变频变压的基本原则。

三相异步电动机定子每相电动势的有效值为

$$E_g = 4.44f_1 N_1 \Phi_m \quad (1-2)$$

式中 E_g ——定子每相由气隙磁通感应的电动势的方均根值, V;

f_1 ——定子频率, Hz;

N_1 ——定子相绕组有效匝数;

Φ_m ——每极磁通量, Wb。

由式 (1-2) 可见, 只要控制好 E_g 和 f_1 , 便可达到控制磁通 Φ_m 的目的。下面分两种情况进行说明。

(1) 基频以下调速。由式 (1-2) 可知, 要保持 Φ_m 不变, 当频率 f_1 从额定值 f_2 向下调时, 必须同时降低 E_g , 使

$$\frac{E_{g1}}{f_1} = \frac{E_{g2}}{f_2} = \text{常值} \quad (1-3)$$

即采用恒定的电动势频率比的控制方式。然而, 绕组中的感应电动势是难以直接控制的, 当电动势的值较高时, 可以忽略定子绕组的漏磁阻抗压降, 而认为定子相电压 $U_1 \approx E_g$, 则得

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{常值} \quad (1-4)$$

这是恒压频比的控制方式, 如图 1-1 所示。

低频时, U_1 和 E_g 都较小, 定子阻抗压降不能再忽略。这时, 可以人为地把电压 U_1 抬高一些, 以便近似地补偿定子压降。带定子阻抗压降补偿的恒压频比控制特性如图 1-1 中的 II 所示, 无补偿的控制特性则为 I。

(2) 基频以上调速。在基频以上调速时, 频率可以从 f_{1N} 往上增高, 但电压 U_1 却不能超过额定电压 U_{1N} , 最多只能保持 $U_1 = U_{1N}$, 这将迫使磁通与频率成反比地降低, 相当于直流电动机弱磁升速的情况。

把基频以上和基频以下两种情况结合起来, 可得图

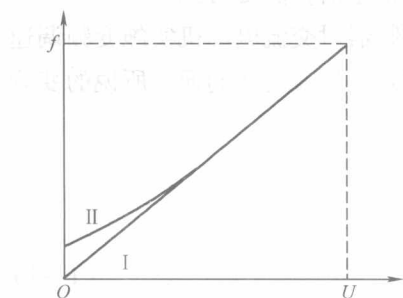


图 1-1 恒压频比控制特性

I—无补偿; II—带定子压降补偿

1-2 所示的异步电动机变频调速控制特性。如果电动机在不同转速下都达到额定电流, 即都能在温升允许条件下长期运行, 则转矩基本上随磁通变化。按照电气传动原理, 在基频以下, 磁通恒定时转矩也恒定, 属于恒转矩调速性质; 而在基频以上, 转速升高时转矩也降低, 基本上属于恒功率调速。

2. 变频器的原理

变频器按照能量变换的环节可以分为交—交变频器和交—直—交变频器。交—交变频器是把频率固定的交流电直接变换成频率连续可调的交流电, 主要优点是没有中间环节, 故变换效率高, 但其连续可调的频率范围窄, 一般为额定频率的 1/2 以下, 故它主要用于容量较大的低

速拖动系统中。交—直—交变频器是把频率固定的交流电整流成直流电，再把直流电逆变成频率连续可调的三相交流电，其原理框图如图 1-3 所示。

交—直—交变频器按照直流环节的储能方式又可以分为电流型交—直—交变频器和电压型交—直—交变频器。电流型交—直—交变频器直流环节的储能元件是电感线圈，电压型交—直—交变频器的直流环节的储能元件是电容器，两者的区别在于前者输出电流的波形是脉宽调制波 (PWM)，后者输出电压的波形是脉宽调制波 (PWM)，如图 1-4、图 1-5 所示。

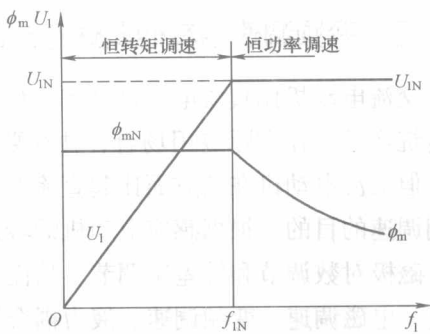


图 1-2 异步电动机变压变频调速控制特性

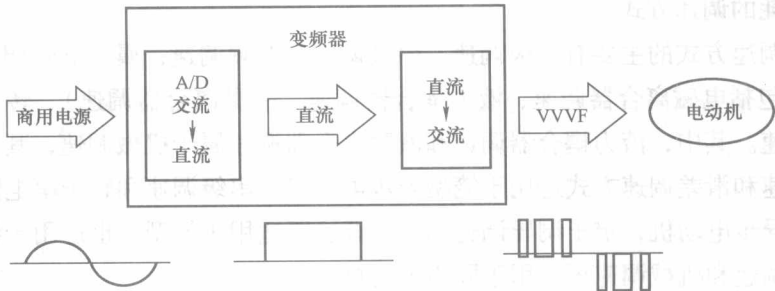


图 1-3 交—直—交变频器原理框图

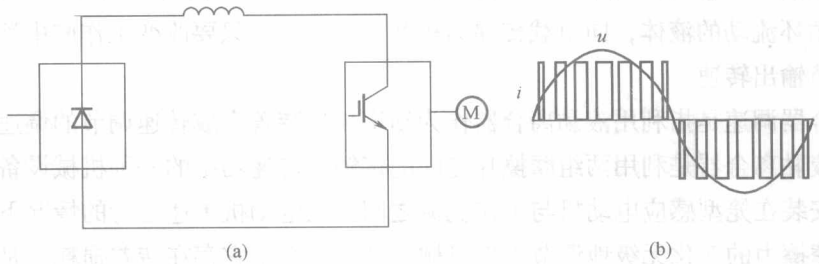


图 1-4 电流型交—直—交变频器

(a) 电路图；(b) 波形图

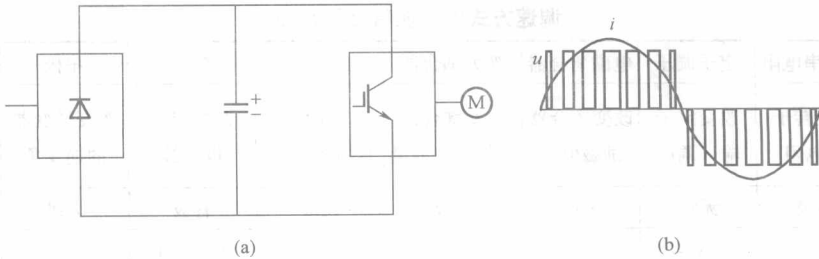


图 1-5 电压型交—直—交变频器

(a) 电路图；(b) 波形图

二、变频调速与其他调速方式的比较

交流电动机比直流电动机经济、耐用，因而被广泛应用于各行各业，是一种量大、面广的传统产品。在实际应用场合，往往要求电动机能随意调节转速，以便获得满意的使用效果，但交流电动机在这方面比起直流电动机而言就要逊色得多，于是不得不借助于其他手段达到调速的目的。根据感应电动机的转速特性表达式可知，它的调速方式有三大类：频率调节、磁极对数调节和转差率调节。从而出现了目前常用的几种调速方法，如变极调速、调压调速、电磁调速、变频调速、液力耦合器调速、齿轮调速等。基于节能角度考虑，通常把交流调速分为高效调速和低效调速。高效调速指基本上不增加转差损耗的调速方式，在调节电动机转速时转差率基本不变，不增加转差损失，或将转差功率以电能形式回馈给电网或以机械能形式回馈给机轴；低效调速则存在附加转差损失，在相同调速工况下，其节能效果低于不存在转差损耗的调速方式。

属于高效调速方式的主要有变极调速、串级调速和变频调速；属于低效调速方式的主要是滑差调速（包括电磁离合器调速、液力耦合器调速、液黏离合器调速）、转子串电阻调速和定子调压调速。其中，液力耦合器调速和液黏离合器调速属于机械调速，其他均属于电气调速。变极调速和滑差调速方式适用于笼型异步电动机，串级调速和转子串电阻调速方式适用于绕线转子异步电动机，定子调压调速和变频调速既适用于笼型，也适用于绕线转子异步电动机。变频调速和机械调速还可用于同步电动机。

液力耦合器调速技术属于机械调速范畴，它是将匹配合适的调速型液力耦合器安装在常规的交流电动机和负载（风机、水泵或压缩机）之间，从电动机输入转速，通过耦合器工作腔中高速循环流动的液体，向负载传递力矩和输出转速。只要改变工作腔中液体的充满程度，即可调节输出转速。

液黏离合器调速是指利用液黏离合器作为功率传递装置完成转速调节的调速方式，属于机械调速。液黏离合器是利用两组摩擦片之间的接触来传递功率的一种机械设备，如同液力耦合器一样安装在笼型感应电动机与工作机械之间，在电动机单速运行的情况下，利用两组摩擦片之间摩擦力的变化无级地调节工作机械的转速，由于它存在转差损耗，是一种低效调速方式。

表 1-1 为各种调速方式的一般性能和特点的汇总。

表 1-1 调速方式的一般特性和特点

调速方式	转子串电阻	定子调压	电磁离合器	液力耦合器	液黏离合器	变极	串级	变频
调速方法	改变转子串电阻	改变定子输入调压	改变离合器励磁电流	改变耦合器工作腔充油量	改变离合器摩擦片间隙	改变定子极对数	改变逆变器的逆变角	改变定子输入频率和电压
调速性质	有级	无级	无级	无级	无级	有级	无级	无级
调速范围	50% ~ 100%	80% ~ 100%	10% ~ 80%	30% ~ 97%	20% ~ 100%	2、3、4 挡转速	50% ~ 100%	50% ~ 100%
响应能力	差	快	较快	差	差	快	快	快

续表

调速方式	转子串电阻	定子调压	电磁离合器	液力耦合器	液黏离合器	变极	串级	变频
电网干扰	无	大	无	无	无	无	较大	有
节电效果	中	中	中	中	中	高	高	高
初始投资	低	较低	较高	中	较低	低	中	高
故障处理	停车	不停车	停车	停车	停车	停车	停车	不停车
安装条件	易	易	较易	场地	场地	易	易	易
适用范围	绕线转子异步电动机	绕线转子异步电动机、 笼型异步电动机	笼型异步电动机	笼型异步电动机、 同步电动机	笼型异步电动机、 同步电动机	笼型异步电动机	绕线转子异步电动机	异步电动机、 同步电动机

三、通用变频器的构造

通用变频器一般都是采用交—直—交的方式组成，其基本构造如图 1-6 所示。通用变频器通常都是由以下两个部分组成。

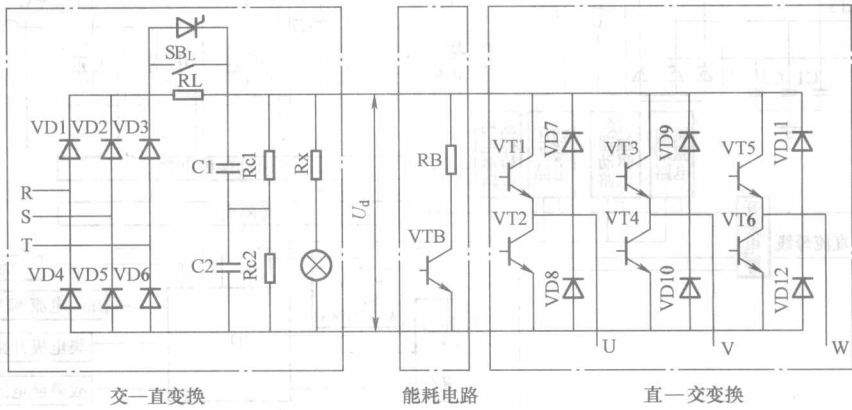


图 1-6 通用变频器的基本构造

1. 主回路

通用变频器的主回路包括整流部分、直流环节、逆变部分、制动或回馈环节等。

(1) 整流部分。通常又被称为电网侧变流部分，是把三相或单相交流电整流成直流电。常见的低压整流部分是由二极管构成的不可控三相桥式电路或由晶闸管构成的三相可控桥式电路。而对中压大容量的整流部分则采用多重化 12 脉冲以上的变流器。

(2) 直流环节。由于逆变器的负载是异步电动机，属于感性负载，因此在中间直流部分与电动机之间总会有无功功率的交换，这种无功能量的交换一般都需要中间直流环节的储能元件（如电容或电感）来缓冲。

(3) 逆变部分。通常又被称为负载侧变流部分，它通过不同的拓扑结构实现逆变元件的规律性关断和导通，从而得到任意频率的三相交流电输出。常见的逆变部分是由六个半导

体主开关器件组成的三相桥式逆变电路。

(4) 制动或回馈环节。由于制动形成的再生能量在电动机侧容易聚集到变频器的直流环节形成直流母线电压的泵升,需及时通过制动环节将能量以热能形式释放或者通过回馈环节转换到交流电网中。

制动环节在不同的变频器中有不同的实现方式,通常小功率变频器都内置制动环节,即内置制动单元,有时还内置短时工作制的标配制动电阻;中功率段的变频器可以内置制动环节,但属于标配或选配,需根据不同品牌变频器的选型手册而定;大功率段的变频器其制动环节大多数为外置制动单元。

从通常意义上来说,回馈环节大多数属于变频器的外置回路。

2. 控制回路

控制回路主要处理变频器的核心软件算法、电流电压信号检测传感、控制信号的输入输出、电路驱动和电路保护。

现在以某品牌 TD 系列变频器为例来介绍控制回路(见图 1-7),它包括以下几个部分。

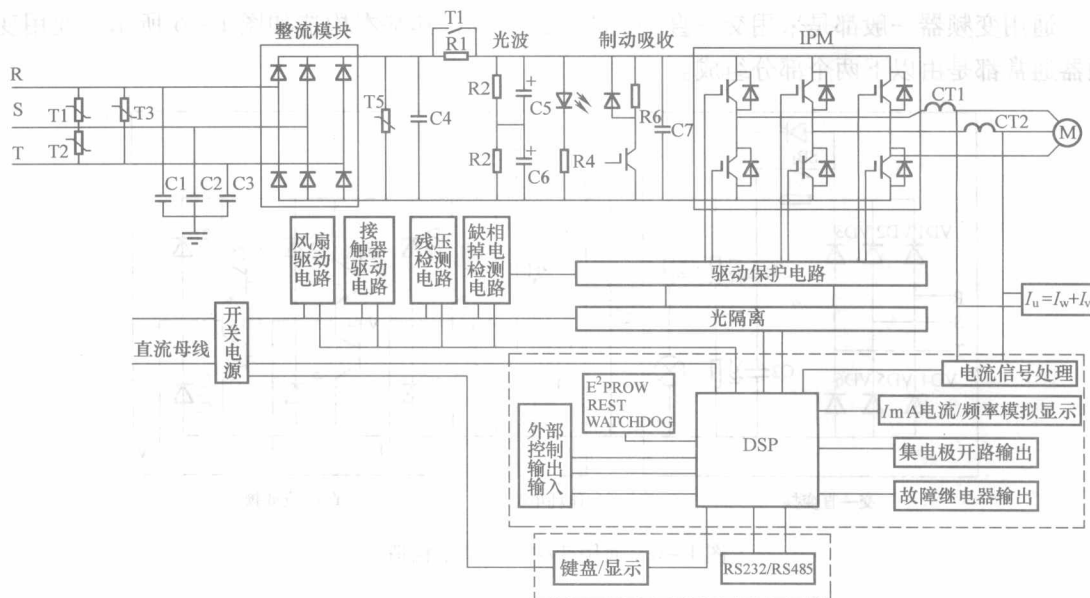


图 1-7 TD 系列变频器控制回路图

(1) 开关电源。变频器的辅助电源采用开关电源,具有体积小、效率高等优点。电源输入为变频器主回路直流母线电压,也可以是交流 380V 整流后的直流电压。通过脉冲变压器的隔离变换和变压器副边的整流滤波可得到多路输出直流电压。其中,15V、-15V、5V 共地。 $\pm 15\text{V}$ 给电流传感器、运算放大器模拟电路供电;5V 给 DSP 及外围数字电路供电;相互隔离的四组或六组 15V 电源给 IPM 驱动电路供电;24V 给继电器、直流风机供电。

(2) DSP (数字信号处理器)。TD 系列变频器采用的 DSP 为 TMS320F240,主要完成电流、电压、温度采样、六路 PWM 输出,各种故障报警输入,电流电压频率设定信号输入,

还完成电动机控制算法的运算等功能。

(3) 输入输出端子。变频器控制电路输入输出端子包括如下四种:

1) 输入多功能选择端子、正反转端子、复位端子等。

2) 继电器输出端子、开路集电极输出多功能端子等。

3) 模拟量输入端子, 包括外接模拟量给定用电源 (12、10V 或 5V)、模拟电压量频率设定输入和模拟电流量频率设定输入。

4) 模拟量输出端子包括输出频率模拟量和输出电流模拟量等, 用户可以选择 $0 \sim 1\text{mA}$ 直流电流表或 $0 \sim 10\text{V}$ 的直流电压表显示输出频率和输出电流, 当然也可以通过功能码参数选择输出信号。

(4) SCI 出口。TMS320F240 支持标准的异步串口通信, 通信波特率可达 625kb/s , 具有多机通信功能, 通过一台上位机可实现多台变频器的远程控制和运行状态监视功能。

(5) 操作面板部分。DSP 通过 SPI 口与操作面板相连, 完成按键信号的输入、显示数据输出等功能。

第二节 变频器的功能与方式选择

一、变频器的控制方式

根据不同的变频控制理论, 其模式主要有以下三种。

1. $V/f=C$ 的正弦脉宽调制模式

其特点是控制电路结构简单、成本较低, 机械特性硬度也较好, 能够满足一般传动的平滑调速要求, 并已在产业的各个领域得到广泛应用。但是, 这种控制方式在低频时, 由于输出电压较低, 转矩受定子电阻压降的影响比较显著, 使输出最大转矩减小。

另外, 其机械特性终究没有直流电动机硬, 动态转矩能力和静态调速性能都还不尽如人意, 且系统性能不高、控制曲线会随负载的变化而变化, 转矩响应慢、电动机转矩利用率不高, 低速时因定子电阻和逆变器死区效应的存在而性能下降, 稳定性变差等。

2. 矢量控制 (VC) 模式

变频器的矢量控制是 20 世纪 70 年代开始迅速发展起来的一种新型控制思想, 是以电动机控制参数的实时解耦, 实现电动机的转矩与磁通控制, 以达到与直流电动机一样的调速性能。异步电动机矢量控制调速系统经过几十年的发展, 其控制方法已趋成熟。

(1) 基本原理。异步电动机的矢量控制是仿照直流电动机的控制方式, 把定子电流的磁场分量和转矩分了解耦开来, 分别加以控制, 即将异步电动机的物理模型等效地变成类似于直流电动机的模式。

众所周知, 交流电动机三相对称的静止绕组 U、V、W 通以三相平衡的正弦电流时, 所产生的合成磁动势是旋转磁动势 F , 它在空间呈正弦分布, 以同步转速 ω (即电流的角频率) 顺着 U-V-W 的相序旋转。这样的物理模型绘于图 1-8 (a) 中。

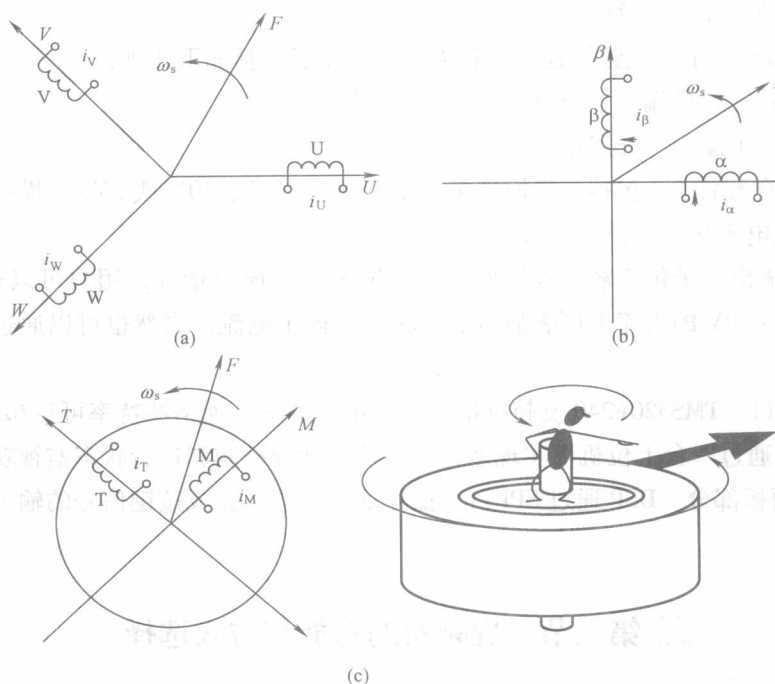


图 1-8 交流电动机绕组等效

(a) 三相交流绕组；(b) 两相交流绕组；(c) 旋转的直流绕组

然而，旋转磁动势并不一定非要三相不可，除单相以外，两相、三相、四相等任意对称的多相绕组，通以平衡的多相电流都能产生旋转磁动势，当然以两相最为简单。如图 1-8 (b) 所示，图中绘出了两相静止绕组 α 和 β ，它们在空间互差 90° ，通以时间上互差 90° 的两相平衡交流电流，也产生旋转磁动势 F 。当图 1-8 (a) 和图 1-8 (b) 的两个旋转磁动势大小和转速都相等时，即认为图 1-8 (b) 的两相绕组与图 1-8 (a) 的三相绕组等效。再看图 1-8 (c) 中的两个匝数相等且互相垂直的绕组 M 和 T ，其中分别通以直流电流 i_M 和 i_T ，产生合成磁动势 F ，其位置相对于绕组来说是固定的。

如果让包含两个绕组在内的整个铁心以同步转速旋转，则磁动势 F 自然也随之旋转起来，成为旋转磁动势。把这个旋转磁动势的大小和转速也控制成与图 1-8 (a) 和图 1-8 (b) 中的磁动势一样，那么这套旋转的直流绕组也就和前面两套固定的交流绕组都等效了。当观察者也站到铁心上和绕组一起旋转时，在他看来， M 和 T 是两个通以直流而相互垂直的静止绕组。如果控制磁通的位置在 M 轴上，就和直流电动机物理模型没有本质上的区别了。这时，绕组 M 相当于励磁绕组， T 相当于伪静止的电枢绕组。

由此可见，以产生同样的旋转磁动势为准则，图 1-8 (a) 的三相交流绕组、图 1-8 (b) 的两相交流绕组和图 1-8 (c) 中整体旋转的直流绕组彼此等效。或者说，在三相坐标系下的 i_U 、 i_V 、 i_W ，在两相坐标系下的 i_α 、 i_β 和在旋转两相坐标系下的直流 i_M 、 i_T 是等效的，它们能产生相同的旋转磁动势。

有意思的是：就图 1-8 (c) 的 M 、 T 两个绕组而言，当观察者站在地面看上去，它们

是与三相交流绕组等效的旋转直流绕组；如果跳到旋转着的铁心上看，它们就的确是一个直流电动机模型了。这样，通过坐标系的变换，可以找到与交流三相绕组等效的直流电动机模型。

(2) 矢量控制框架与坐标变换。图 1-9 (a) 所示为矢量控制的基本框架，即将异步电动机按照等效直流电动机模型进行控制。

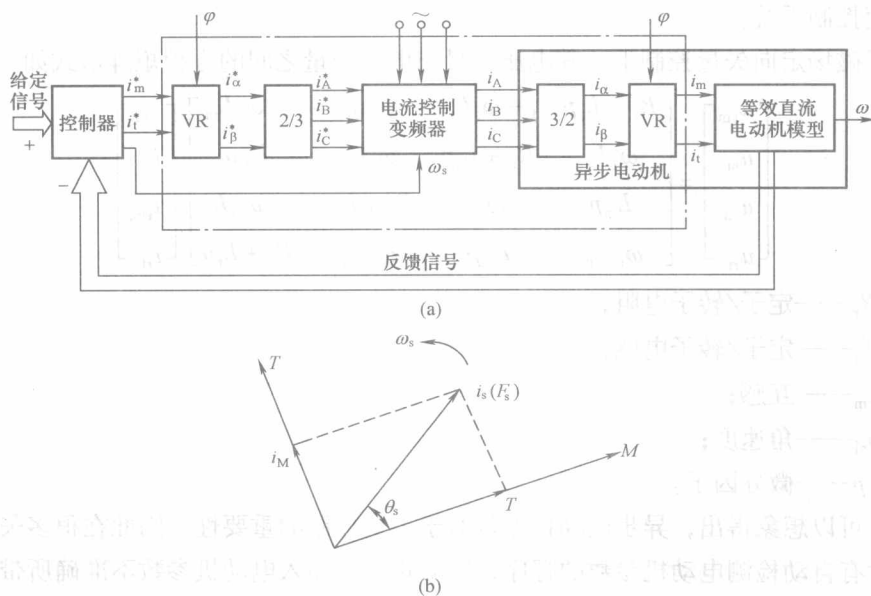


图 1-9 矢量控制基本框架和坐标变换

(a) 矢量控制基本框架；(b) K/P 变换

图 1-9 (a) 中要涉及多个坐标变化，包括 2/3 相变换、2s/2r 变换、K/P 变换等。

1) 3/2 相变换和 2/3 相变换。在三相静止绕组 U、V、W 和两相静止绕组 α 、 β 之间的变换，称为三相静止坐标系和两相静止坐标系间的变换，简称 3/2 相变换。反之，则称为 2/3 相变换。

2) 2s/2r 变换和 2r/2s 变换。从两相静止坐标系 α 、 β 到两相旋转坐标系 M 、 T 变换称作两相—两相旋转变换，简称 2s/2r 变换，其中 s 表示静止，r 表示旋转。反之，则称为 2r/2s 变换。

3) K/P 变换。令矢量 i_s 和 M 轴的夹角为 θ_s ，已知 i_M 和 i_T ，求 i_s 和 θ_s ，就是直角坐标/极坐标变换，简称 K/P 变换，如图 1-9 (b) 所示。

了解了坐标变换后，就可以理解矢量控制的主要步骤：要把三相静止坐标系上的电压方程、磁链方程和转矩方程都变换到两相旋转坐标系上来，可以先利用 3/2 相变换将方程式中定子和转子的电压、电流、磁链和转矩都变换到两相静止坐标系 α 、 β 上，然后再用旋转变换阵 $C_{2s/2r}$ [图 1-9 (a) 中的 VR]，将这些变量变换到两相旋转坐标系 M 和 T 上。

因此，从图 1-9 中可以这样认为，在控制器后面引入的反旋转变换器 VR^{-1} 与电动机内部的旋转变换环节 VR 抵消，2/3 变换器与电动机内部的 3/2 变换环节抵消，如果再

忽略变频器中可能产生的滞后,则虚线框内的部分可以完全删去,剩下的就是直流调速系统了。

(3) 转子磁场定向下的异步电动机数学模型。矢量控制就是通过坐标变换,实现定子侧控制量的解耦,该方法是分析异步电动机数学模型,简化电磁关系,实现控制系统设计的有效手段。由于转子磁场定向旋转坐标系下异步电动机数学模型意义明确、简化实用,常用于设计调速控制系统。

在转子磁场定向矢量控制下,其电压矢量与电流矢量之间的方程矩阵形式如下所示:

$$\begin{bmatrix} u_{sm} \\ u_{st} \\ u_{rm} \\ u_{rt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & -\omega_s L_s & L_m p & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s + L_s p & \omega_s L_m & L_m p \\ L_m p & -\omega_s L_m & R_r + L_r p & -\omega_{sl} L_r \\ \omega_{sl} L_m & L_m p & \omega_{sl} L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sm} \\ i_{st} \\ i_{rm} \\ i_{rt} \end{bmatrix} \quad (1-5)$$

式中 R_s/R_r ——定子/转子电阻;

L_s/L_r ——定子/转子电感;

L_m ——互感;

ω_{sl} ——角速度;

p ——微分因子。

显然,可以想象得出,异步电动机参数对于矢量控制的重要性,因此在很多矢量控制变频器中都含有自动检测电动机参数的程序,以防止用户输入电动机参数不准确所带来的控制精度误差。

(4) 基于 CRPWM 的磁链闭环转子磁场定向控制调速系统。电流跟踪型 PWM 又称电流控制型电压源 PWM 逆变器 (CRPWM), 它兼有电压型和电流型逆变器的优点: 结构简单、工作可靠、响应快、谐波小, 采用电流控制, 可实现对电动机定子相电流的在线控制, 特别适用于高性能的矢量控制系统。CRPWM (电流跟踪型 PWM) 是把希望输出的电流波形作为指令信号, 把实际的电流波形作为反馈信号, 通过两者的瞬时值比较来决定逆变电路各功率开关器件的通断, 使实际输出跟踪指令信号。使输出电流基本按照给定的正弦波变化。如果 SPWM 波频率较高, 可以使电动机的电流得到高品质的动态响应, 使得输出电流的谐波含量较少, 电动机转矩脉动小, 电动机运行更平稳。采用磁通闭环的调速系统, 可实现恒转矩启动, 速度响应快, 动静态性能好。根据电动机转子磁场定向数学模型, 我们建立了 CRPWM 矢量控制调速系统框图, 如图 1-10 所示。

从图 1-10 中分析得出: ① 磁链给定信号由函数发生程序获得; ② 转速调节器 ASR 的输出作为转矩给定信号, 弱磁时它还受到磁链给定信号的控制; ③ 在转矩内环中, 磁链对控制对象的影响相当于一种扰动作用, 因而受到转矩内环的抑制, 从而改造了转速子系统, 使它少受磁链变化的影响。

3. 直接转矩控制 (DTC) 模式

直接转矩控制是利用空间矢量坐标的概念, 在定子坐标系下分析交流电动机的数学模型, 控制电动机的磁链和转矩, 通过检测定子电阻来达到观测定子磁链的目的, 因此省去了