

# 轻松解读

## 三菱变频器原理与应用

郑风翼 编著



YZLI0890127976



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 轻松解读三菱变频器原理 与应用

郑凤翼 编著



YZLI0890127976



机械工业出版社

本书主要内容有变频器的基本组成和工作原理；三菱 FR—540 变频器的组成、端子功能和功能参数；变频器的基本应用；变频器的工程应用；变频器的选择、安装、调试与维护。

本书文字精炼，通俗易懂，内容丰富，分析详细、清晰，在写法上尽量运用图解的方法，图文相辅相成。在内容上力求简明实用，并采用深入浅出、图文并茂的表达方式，通俗易懂。

本书适合广大初、中级电工人员阅读，也可供大专院校相关专业师生参考。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

轻松解读三菱变频器原理与应用/郑凤翼编著.

—北京：机械工业出版社，2012.1

ISBN 978 - 7 - 111 - 36344 - 6

I. ①轻… II. ①郑… III. ①变频器—基本知识  
IV. ①TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 226915 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：徐明煜 责任编辑：王 琪

版式设计：张世琴 责任校对：张玉琴

封面设计：陈 沛 责任印制：乔 宇

三河市国英印务有限公司印刷

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 12.25 印张 · 301 千字

0001—3500 册

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 36344 - 6

定价：29.80 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010) 88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010) 68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010) 88379649

读者购书热线：(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

变频器是一种电动机驱动调速设备，它通过改变电动机工作电源的频率和幅度来控制交流电动机的转速和转矩，从工厂设备到家用空调器都可以采用，在节能、减少维修、提高产量、保证质量等方面都取得了明显的经济效益，因此在许多行业得到了广泛的应用，而且应用领域正在不断扩大。

近年来，由于变频器的迅速普及，使得学习、掌握和应用变频器技术对提高我国工业自动化水平和生产效率具有十分重要的意义，因此变频器技术已是广大电气技术人员、电工人员必须掌握的一门专门技术。为了进一步普及、推广这一先进的自动控制技术，特编写本书，奉献给广大初学者。

本书从应用角度出发，对变频器的原理仅做简单的定性介绍，重点介绍变频器的应用。

本书主要内容有：变频器的基本组成和工作原理；三菱FR—540型变频器的组成、端子功能和功能参数；变频器的基本应用；变频器的工程应用；变频器的选择、安装、调试与维护。

本书文字精炼，通俗易懂，内容丰富，分析详细、清晰。在写法上，本书尽量运用图解的方法，图文相辅相成；在内容上力求简明实用，并采用深入浅出、图文并茂的表达方式，通俗易懂。

本书适合广大初、中级电工人员阅读。

本书主要由郑凤翼编写，参加编写的还有陈皓、耿立文、郑丹丹、孟庆涛、齐宝霞、郑晰晖、刘新善、李红霞、王晓琳、温永库、苏阿莹、王军生、徐占国、冯建辉、张萍等。

在编写本书的过程中，编者参考了一些书刊杂志，并引用其中的一些资料，难以一一列举，在此一并向有关书刊杂志的作者表示衷心的感谢。

编 者



# 目 录

## 前言

## 第 1 章 变频器的的发展、分类和应用

- 应用 ..... 1
- 1.1 变频器技术的发展 ..... 1
- 1.2 变频器的分类 ..... 1
  - 1.2.1 按变频器的主电路结构形式分类 ..... 1
  - 1.2.2 按变频电源的性质分类 ..... 2
  - 1.2.3 按变频器的控制方式分类 ..... 3
  - 1.2.4 交-直-交变频器的分类 ..... 4
  - 1.2.5 按变频器的用途分类 ..... 5
- 1.3 变频器的作用 ..... 5
- 1.4 变频器的应用 ..... 7

## 第 2 章 变频器的原理与控制方式

- 2.1 变频器的基本工作原理 ..... 8
- 2.2 变频器的组成 ..... 9
  - 2.2.1 主电路 ..... 10
  - 2.2.2 变频器控制电路 ..... 12
- 2.3 变频器的控制方式 ..... 13
  - 2.3.1  $U/f$ 控制方式 ..... 13
  - 2.3.2 转差频率控制方式 ..... 14
  - 2.3.3 矢量控制方式 ..... 15
  - 2.3.4 直接转矩控制方式 ..... 16
- 2.4 变频器的额定参数和技术指标 ..... 17
  - 2.4.1 变频器的额定参数 ..... 17
  - 2.4.2 变频器的技术指标 ..... 18

## 第 3 章 三菱 FR—A540 型变频器

- 3.1 FR—A540 型变频器的端子图及端子说明 ..... 19
  - 3.1.1 主电路接线端子 ..... 20
  - 3.1.2 控制电路接线端子 ..... 20
- 3.2 FR—A540 型变频器的操作使用 ..... 23

- 3.2.1 FR—DU04 型操作面板的名称和功能 ..... 23
- 3.2.2 操作面板的使用 ..... 24
- 3.3 变频器的操作模式 ..... 27
  - 3.3.1 外部操作模式 ..... 28
  - 3.3.2 PU 操作模式 ..... 30
  - 3.3.3 外部/PU 组合操作模式 ..... 31
- 3.4 常用控制功能与参数设置 ..... 32
  - 3.4.1 三菱 FR—A540 型变频器的功能和参数 (见表 3-10) ..... 32
  - 3.4.2 变频器运行前的功能参数预置 ..... 39
  - 3.4.3 变频器的常用功能参数 ..... 39
  - 3.4.4 频率的给定方式与选择 ..... 51
- 3.5 变频器的接线 ..... 55
  - 3.5.1 主电路接线 ..... 55
  - 3.5.2 控制电路接线 ..... 59
  - 3.5.3 与 PU 接口的连接 ..... 65
  - 3.5.4 变频器与 PLC 的连接方式 ..... 66

## 第 4 章 变频器的基本应用电路

- 4.1 导读 ..... 69
  - 4.1.1 本章的写作特点 ..... 69
  - 4.1.2 变频器的基本功能参数 ..... 70
- 4.2 电动机单向运行的控制电路 ..... 71
  - 4.2.1 电动机的点动控制 ..... 71
  - 4.2.2 开关控制的电动机控制电路 ..... 71
  - 4.2.3 继电器控制的电动机控制电路 ..... 72
  - 4.2.4 PLC 控制的电动机正转控制电路 ..... 73
- 4.3 电动机正/反转控制电路 ..... 74
  - 4.3.1 开关控制的电动机正/反转控制电路 ..... 74

4.3.2 继电器控制的电动机正/反转 控制电路 .....	75	<b>第6章 变频器的选择、安装、调试与 维护</b> .....	167
4.3.3 PLC 控制的电动机正/反转控制 电路 .....	76	6.1 变频器的选择 .....	167
4.4 变频与工频的切换 .....	78	6.1.1 变频器类型及其外围设备的 选择 .....	167
4.4.1 变频与工频切换功能 .....	78	6.1.2 变频器外接主电路及主要电器的 选择 .....	168
4.4.2 变频与工频切换控制电路 .....	82	6.2 变频器的安装 .....	173
4.5 多段速控制 .....	91	6.2.1 安装环境的要求 .....	173
4.5.1 多段速控制功能 .....	91	6.2.2 安装方法 .....	174
4.5.2 多挡转速控制电路 .....	93	6.2.3 电气柜设计 .....	175
4.6 程序功能 .....	102	6.3 变频器的接线 .....	175
4.6.1 程序控制功能 .....	102	6.3.1 导线的选择 .....	175
4.6.2 程序控制的应用 .....	109	6.3.2 导线的排布 .....	176
4.7 变频器的 PID 控制及应用 .....	111	6.3.3 主电路的接线 .....	177
4.7.1 PID 控制的基本概念 .....	111	6.3.4 控制电路的接线 .....	179
4.7.2 PID 的应用——变频器 PID 控制的 恒压供水系统 .....	122	6.4 变频器的调试 .....	180
<b>第5章 变频器的工程应用</b> .....	126	6.4.1 检查安装质量 .....	180
5.1 风机的变频器控制 .....	126	6.4.2 熟悉变频器的操作面板 .....	181
5.1.1 吸尘风机的控制 .....	126	6.4.3 空载试验 .....	181
5.1.2 冲天炉鼓风机的变频调速 系统 .....	129	6.4.4 带载试验 .....	181
5.1.3 利用变频器对鼓风机进行程控 调速控制 .....	131	6.5 变频器测试 .....	182
5.2 8 站小推车和电梯轿厢开关门的 变频器控制 .....	137	6.5.1 测量仪表的选择 .....	182
5.2.1 8 站小推车自动控制 .....	137	6.5.2 变频器绝缘测试 .....	183
5.2.2 电梯轿厢开关门控制系统 .....	143	6.5.3 变频器主电路的测量 .....	184
5.3 供水调速系统的变频器控制 .....	147	6.5.4 变频器在路电阻的测量 .....	186
5.3.1 变频器恒压供水调速系统 .....	147	6.6 变频器的维护 .....	186
5.3.2 冷却水泵节能循环运行控制 .....	157	6.6.1 变频器的日常维护与检查 .....	186
		6.6.2 变频器的常见故障与处理 .....	188
		<b>参考文献</b> .....	190

# 第 1 章 变频器的发展、分类和应用

## 1.1 变频器技术的发展

变频器是将固定电压、固定频率的交流电变换为电压可调、频率可调的交流电的装置。变频器技术随着微电子技术、电力电子技术、计算机技术和自动控制理论等的不断发展而发展，其应用也越来越普遍。

### 1. 变频器的发展

电力电子器件是变频器发展的基础。

第一代电力电子器件是以 1956 年出现的晶闸管为代表。晶闸管是电流控制型开关器件，只能通过门极控制其导通而不能控制其关断，因此也称为半控器件。由晶闸管组成的变频器工作频率较低，应用范围很窄。

第二代电力电子器件是以门极关断晶闸管（GTO）和电力晶体管（GTR）为代表。这两种是电流型自关断器件，可以方便地实现逆变和斩波，但其开关频率仍然不高，一般在 5kHz 以下。尽管这时已经出现了脉宽调制（PWM）技术，但因斩波频率和最小脉宽都受到限制，难以得到较为理想的正弦脉宽调制波形，会使异步电动机在变频调速时产生刺耳的噪声，因而限制了变频器的推广和应用。

第三代电力电子器件是以电力 MOS 场效应晶体管（MOSFET）和绝缘栅双极型晶体管（IGBT）为代表，在 20 世纪 70 年代开始应用。这两种是电压型自关断器件，基极（栅极、门极）信号功率小，其开关频率可达到 20kHz 以上，采用 PWM 的逆顺谐波噪声大大降低。低压变频器的容量在 380V 级达到了 540kVA；而 600V 级则达到了 700kVA，最高输出频率可达 400 ~ 600Hz，能对中频电动机进行调频控制。利用 IGBT 构成的高压（3kV/6.3kV）变频器最大容量可达 7460kW。

第四代电力电子器件是以智能化功率集成电路（PIC）和智能功率模块（IPM）为代表。它们实现了开关频率的高速化、低导通电压的高效化和功率器件的集成化，另外还可集成逻辑控制、保护、传感及测量等功能。

### 2. 变频技术的发展趋势

变频技术的发展方向是高电压、大容量化、变频化、组件模块化、微型化、智能化和低成本化，多种适宜变频调速的新型电动机正在开发研制之中。IT 技术的迅猛发展，以及控制理论的创新，这些技术都将影响变频器发展的趋势。

## 1.2 变频器的分类

### 1.2.1 按变频器的主电路结构形式分类

按变频器主电路的结构形式可分为交 - 直 - 交变频器和交 - 交变频器。

1) 交 - 直 - 交变频器首先通过整流电路将电网的交流电整流成直流电，再由逆变电路

将直流电逆变为频率和幅值均可变的交流电。交-直-交变频器的主电路结构如图 1-1 所示。

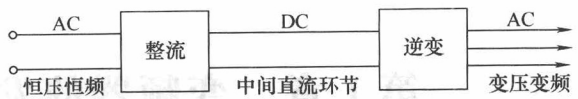


图 1-1 交-直-交变频器的主电路结构

2) 交-交变频器是把一种频率的交流电直接变换为另一种频率的交流电，中间不经过直流环节。它的基本结构如图 1-2 所示。

常用的交-交变频器输出的每一相都是一个两组晶闸管整流装置反并联的可逆电路。正、反向两组按一定周期相互切换，在负载上就获得交变的输出电压  $u_o$ 。输出电压  $u_o$  的幅值决定于各组整流装置的控制角  $\alpha$ ，输出电压  $u_o$  的频率决定于两组整流装置的切换频率。如果控制角  $\alpha$  一直不变，则输出平均电压是方波，要得到正弦波输出，就需在每一组整流器导通期间不断改变其控制角。

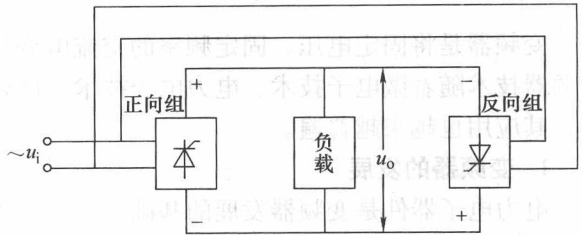


图 1-2 交-交变频器的电路结构

对于三相负载，交-交变频器其他两相也各用一套反并联的可逆电路，输出平均电压的相位依次相差  $120^\circ$ 。

交-交变频器由其控制方式决定了它的最高输出频率只能达到电源频率的  $1/3 \sim 1/2$ ，不能高速运行，这是它的主要缺点。但由于没有中间环节，不需换流，提高了变频效率，并能实现四象限运行，因而交-交变频器多于低速大功率系统中，如回转窑、轧钢机等。

## 1.2.2 按变频电源的性质分类

变频器按变频电源的性质可分为电压型变频器和电流型变频器。对交-直-交变频器，电压型变频器与电流型变频器的主要区别在于中间直流环节采用什么样的滤波器。

### 1. 电压型变频器

电压型变频器的主电路典型形式如图 1-3 所示。在该电路中，中间直流环节采用大电容滤波，直流电压波形比较平直，使施加于负载上的电压值基本上不受负载的影响，而基本保持恒定，类似于电压源，因而称为电压型变频器。

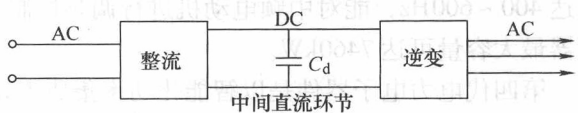


图 1-3 电压型变频器的主电路结构

电压型变频器逆变输出的交流电压为矩形波或阶梯波，而电流的波形经过电动机负载滤波后接近于正弦波，但有较大的谐波分量。

由于电压型变频器是作为电压源向交流电动机提供交流电功率的，主要优点是运行几乎不受负载的功率因素或换流的影响；缺点是当负载出现短路或在变频器运行状态下投入负载，都易出现过电流现象，必须在极短的时间内施加保护措施。

### 2. 电流型变频器

电流型变频器与电压型变频器在主电路结构上基本相似，不同的是电流型变频器的中间直流环节采用大电感滤波，如图 1-4 所示，直流电流波形比较平直，使施加于负载上的电流值稳定不变，基本不受负载的影响，其特性类似于电流源，因此称为电流型变频器。

电流型变频器的整流部分一般采用相控整流或直流斩波,通过改变直流电压来控制直流电流,构成可调的直流电源,达到控制输出的目的。

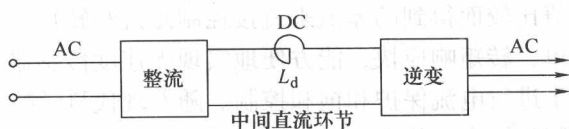


图 1-4 电流型变频器的主电路结构

电流型变频器由于电流的可控性较

好,可以限制由于逆变装置换流失败或负载短路等引起的过电流,保护的可靠性较高,因此多用于要求频繁加速或四象限运行的场合。

一般的交-交变频器虽然没有滤波电容,但供电电源的低阻抗使它具有电压源的性质,也属于电压型变频器。也有的交-交变频器用电抗器将输出电流强制变成矩形波或阶梯波,具有电流源的性质,属于电流型变频器。

### 1.2.3 按变频器的控制方式分类

按控制方式的不同,变频器可以分为  $U/f$  控制、SF 控制、矢量控制 (VC) 和直接转矩控制 4 种类型。

#### 1. $U/f$ 控制变频器

$U/f$  控制即压频比控制,其基本特点是对变频器输出的电压和频率同时进行控制。通过保持  $U/f$  恒定使电动机获得所需的转矩特性。基频以下可以实现恒转矩调速,基频以上则可以实现恒功率调速。这种方式控制电路成本低,多用于精度要求不高的通用变频器。

#### 2. SF 控制变频器

SF 控制即转差频率控制,是在  $U/f$  控制基础上的一种改进方式。在  $U/f$  控制的前提下,如果负载变化,转速也会随之变化,转速的变化量与转差率成正比。采用  $U/f$  控制时,其静态调速精度较差,而采用 SF 控制方式可以提高调速精度。采用 SF 控制方式时,变频器通过电动机、速度传感器构成速度反馈闭环调速系统。变频器的输出频率由电动机的实际转速与转差频率之和来自动设定,从而达到在调速控制的同时也使输出转矩得到控制。SF 控制方式属于闭环控制,因此与  $U/f$  控制相比,在调速精度与转矩特性两方面都较好。但是由于这种控制方式需要在电动机轴上安装速度传感器,并需要依据电动机特性调节转差频率,因此通用性较差。

#### 3. VC 变频器

$U/f$  控制方式和 SF 控制方式对动态性能的控制不好,为了获得更高的变频调速动态性能,应采用矢量控制方式。矢量控制 (Vector Control, VC) 是交流电动机的一种理想调速方法,其基本原理是将异步电动机的定子电流分为产生磁场的电流分量 (励磁电流) 和与其相垂直的产生转矩的电流分量 (转矩电流) 并分别加以控制,获得类似于直流电动机的动态特性。在这种控制方式中必须同时控制异步电动机定子电流的幅值和相位,即控制定子电流矢量。采用 VC 方式,在调速范围上可以与直流电动机相比,此外还可控制电动机转矩。其主要优点是,能调节电动机转矩,在整个电动机转速范围提供恒定转矩,低频转矩大,机械特性及动态特性好。

#### 4. 直接转矩控制变频器

直接转矩控制技术不需考虑如何将定子电流分解为励磁电流分量和转矩电流分量,它主要通过检测获得的定子电压、电流,借助空间矢量理论计算电动机的磁链和转矩,通过与设

定值比较而得到的差值来直接控制磁链和转矩。采用这种控制方式时，电路系统及控制结构简单，转矩响应快，能方便地实现无速度传感器控制，但是由于没有独立的电流环，系统不便于进行电流保护和饱和控制。随着现代科学技术的不断发展，直接转矩控制技术将与智能控制相结合，使交流调速系统的性能有一个根本的提高，这是直接转矩控制的未来。

### 1.2.4 交-直-交变频器的分类

根据调压方式的不同，交-直-交变频器又分为脉幅调制（PAM）和脉宽调制（PWM）两种。

1) 脉幅调制（Pulse Amplitude Modulation, PAM）是通过改变电压源的电压  $E_d$  或电流源的电流  $I_d$  的幅值进行输出控制的方式。因此，PAM 在逆变器部分只控制频率，整流器部分只控制电压或电流。采用 PAM 调压时，变频器的输出电压波形如图 1-5 所示。

PAM 方式又分为两种：一种是调压采用可控整流（即把交流电整流为直流电的同时进行相控整流调压），调频采用三相六拍逆变器。这种方式结构简单、控制方便，但由于输入环节采用晶闸管可控整流器，当电压调得较低时，电网端功率因数较低，而输出环节采用晶闸管组成的三相六拍逆变器，每周挽相六次，输出的谐波较大。

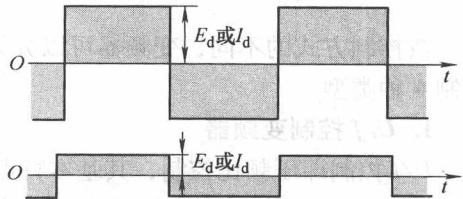


图 1-5 脉幅调制方式调压

另一种是采用不可控整流、斩波调压，即整流环节采用二极管不可控整流，只整流不调压，再单独设置 PWM 斩波器，用脉宽调压，调频仍采用三相六拍逆变器，这种方式虽然多了一个环节，但调压时输入功率因数不变，克服了第一种方式中输入功率因数低的缺点。但是，其输出逆变环节未变，仍有谐波较大的问题。

2) 脉宽调制（Pulse Width Modulation, PWM）指变频器输出电压的大小是通过改变输出脉冲的占空比来实现的，它是将 VV（调压）与 VF（调频）集中于逆变器一起来完成的。目前使用最多的是占空比按正弦规律变化的正弦波脉宽调制方式，即 SPWM 方式。用 PWM 方式调压输出的波形如图 1-6 所示。

PWM 方式采用不可控整流，因此输入功率因数不变，用 PWM 逆变的同时进行调压和调频，则输出谐波可以减少。

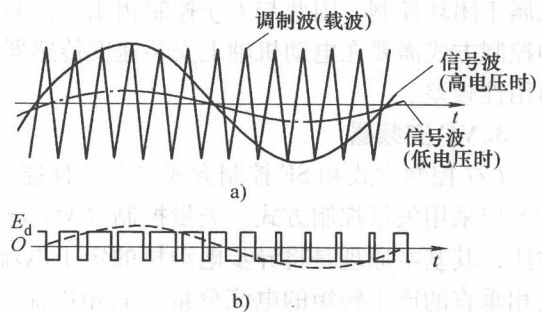


图 1-6 用 PWM 方式调压输出的波形

a) 调制原理 b) 输出电压波形

在 VVVF（Variable Voltage Variable Frequency）调制技术发展的早期均采用 PAM 方式，这是由于当时的半导体器件是普通晶闸管等半控型器件，其开关频率不高，所以逆变器输出的交流电压波形只能是方波。而要

使方波电压的有效值随输出频率的变化而改变，只能靠改变方波的幅值，即只能靠前面的环节改变中间直流电压的大小。随着全控型快速半导体开关器件 BJT、IGBT、GTO 等的发展，才逐渐发展出了 PWM 方式。由于 PWM 方式具有输入功率因数高、输出谐波少的优点，因此在中小功率的变频器中，几乎全部采用 PWM 方式。但由于大功率、高电压的全控型开关



器件的价格还较昂贵,因此为降低成本,在数百千瓦以上的大功率变频器中,有时仍需要使用以普通晶闸管为开关器件的PAM方式。

### 1.2.5 按变频器的用途分类

#### 1. 通用变频器

通用变频器的特点是其通用性。随着变频技术的发展和市场需要的不断扩大,通用变频器也在朝着两个方向发展:一是低成本的简易型通用变频器;二是高性能的多功能通用变频器。

1) 简易型通用变频器。它是一种以节能为主要目的且简化了一些系统功能的通用变频器。它主要应用于水泵、风扇、鼓风机等对于系统调速性能要求不高的场合,并具有体积小、价格低等方面的优势。

2) 高性能的多功能通用变频器。这种通用变频器在设计过程中充分考虑了应用时可能出现的各种需要,并为满足这些需要而在系统软件和硬件方面都做了相应的准备。在使用时,用户可以根据负载特性选择算法并对变频器的各种参数进行设定,也可以根据系统的需要选择厂家所提供的各种备用选件来满足系统的特殊需要。高性能的多功能通用变频器除了可以应用于简易型通用变频器的所有应用领域之外,还可以广泛应用于电梯、数控机床、机动车辆等对调速系统的性能有较高要求的场合。

#### 2. 专用变频器

1) 高性能专用变频器。随着控制理论、交流调速理论和电力电子技术的发展,异步电动机的VC得到发展,VC变频器及其专用电动机构成的交流伺服系统的性能已经达到并超过了直流伺服系统。此外,由于异步电动机还具有环境适应性强、维护简单等许多直流伺服电动机所不具备的优点,在要求高速、高精度的控制中,这种高性能交流伺服变频器正在逐步代替直流伺服系统。

2) 高频变频器。在超精密机械加工中常要用高速电动机,为了满足其驱动的需要,出现了采用PAM控制的高频变频器,其输出主频可达3kHz,驱动两极异步电动机时的最高转速为180000r/min。

3) 高压变频器。高压变频器一般是容量的变频器,最大功率可做到5000kW,电压等级为3kV、6kV、10kV。

## 1.3 变频器的作用

变频调速能够应用在大部分的电动机拖动场合,由于它能提供精确的速度控制,因此可以方便地控制机械传动的上升、下降和变速运行。变频器应用还可以大大地提高工艺的高效性(变速不依赖于机械部分),同时可以比原来的定速运行电动机更加节能。变频器主要有以下作用。

1) 控制电动机的起动电流。当电动机通过工频直接起动时,它将使起动电流达到额定电流的7~8倍。这个电流值将大大增加电动机绕组的电应力并产生热量,这样就会降低电动机的寿命。而变频调速则可以在零速零电压下起动(当然可以适当增加转矩提升)。一旦频率和电压的关系建立后,变频器就可以按照 $U/f$ 或矢量控制方式带动负载进行工作。使用变频调速能充分降低起动电流,提高绕组承受力,带给用户最直接的好处就是电动机的维护

成本将进一步降低,电动机的寿命相应增加。

2) 降低电力线路的电压波动。在电动机工频起动,电流剧增的同时,电压也会大幅度波动,电压下降的幅度将取决于起动电动机的功率大小和配电网的容量。电压幅度下降将会导致同一供电网络中的对电压敏感的设备故障跳闸或工作异常,如PC、传感器、接近开关和接触器等均会动作出错。而采用变频调速后,由于能在零频零压时逐步起动,则能最大程度避免电压幅度下降。

3) 起动时需要的功率更低。电动机功率与电流和电压的乘积成正比,那么通过工频直接起动的电动机消耗的功率将大大高于变频起动所需要的功率。在一些工况下其配电系统已经达到了最高极限,直接工频起动的电动机所产生的电涌就会对同电网上的其他用户产生严重的影响,从而将受到电网运营商的警告,甚至罚款。如果采用变频器进行电动机起/停,就不会产生类似的问题。

4) 可控的加速功能。变频调速能在零速时起动并按照用户的需要进行平滑地加速,而且其加速曲线也可以选择(直线加速、S形加速或者自动加速)。而通过工频起动时,电动机及与其相连的机械部分轴或齿轮都会产生剧烈的振动。这种振动将进一步加剧机械磨损和损耗,减少机械部件和电动机的寿命。

5) 可调的运行速度。运用变频调速能优化工艺过程,并能根据工艺过程迅速改变,还能通过远控PLC或其他控制器来实现速度变化。

恒转矩负载要选用过载能力大的变频器;对于恒功率负载,由于转速与转矩成反比,需要解决低速段转矩问题;对于风机、泵类负载,负载与转速的二次方成正比,只要注意基频以上时的变频器和电动机的功率即可。

当变频器采用正弦波脉冲宽度调制时,内部采用微处理器实现全数字化控制。当变频器采用按转子磁场定向的矢量控制技术时,即使不安装测速发电机或编码器也能得到很宽的调速范围、平滑的调速特性及快速的动态响应。当变频器采用变压变频控制方式时,基本可保持磁通在各级转速上稳定,机械特性随转速下降而平行下移,硬度特性好。

6) 可调的转矩极限。通过变频调速后,能够设置相应的转矩极限来保持机械不致损坏,从而保证工艺过程的连续性和产品的可靠性。目前的变频技术不仅使得转矩极限可调,甚至转矩的控制精度都能达到3%~5%。在工频状态下,电动机只能通过检测电流值或热保持来进行控制,而无法像在变频控制一样设置精确的转矩值来动作。

7) 受控的停止方式。如同可控的加速一样,在变频调速中,停止方式可以受控,并且有不同的停止方式可以选择(减速停止、自由停止、减速停止+直流制动),同样它能减少对机械部件和电动机的冲击,从而使整个系统更加可靠,寿命也会相应增加。

变频器传动可以方便地实现电动机的电气制动,有时在某些应用中还应与机械制动相互配合使用。电气制动包括能耗制动、直流制动和回馈(再生)制动等3种方式。能耗制动一般应用在设备静止或减速后使设备静止的过程中,制动程度很低,但仅要求停止运行时可采用直流制动,回馈制动主要应用在设备的稳速运行和减速过程中。

8) 节能。离心风机或水泵采用变频器后都能大幅度地降低能耗,这在十几年的工程经验中已经得到了体现。由于最终的能耗是与电动机转速的三次方成正比,所以采用变频器后投资回报就更快,厂家也乐意接受。

降低电动机转速可得到立方级的节能效果。此外,为迅速适应负载扰动,变频器具有动

态调整特性,可始终保持电动机的高效率输出运行;在保证电动机输出转矩的情况下,变频器自身具有  $U/f$  调节功能,可减少电动机输出转矩,降低输入电流,达到节能状态。

利用变频调速达到节能,以风机和泵类机械效果最为明显。在搅拌机、工业洗衣机等恒转矩负载机械领域中,当低速运行时,利用变频调速也可以获得节能效果。

9) 可逆运行控制。在变频器控制中,要实现可逆运行控制无需额外的可逆控制装置,只需要改变输出电压的相序即可,这样就能降低维护成本和节省安装空间。

10) 减少机械传动部件。目前矢量控制变频器加上同步电动机就能实现高效的转矩输出,从而节省齿轮箱等机械传动部件,最终构成直接变频传动系统,达到降低成本和空间,提高设备性价比的目的。

## 1.4 变频器的应用

### 1. 在节能方面的应用

变频调速已被认为是最理想、最有发展前途的调速方式之一。

风机、泵类负载采用变频调速后,节电率可以达到 20% ~ 60%,这是由于风机、泵类负载的耗电功率基本与转速的三次方成正比。当用户需要的平均流量较小时,风机、泵类采用变频调速后其转速降低,节能效果非常可观。而传统的风机、泵类采用挡板和阀门进行流量调节,电动机转速基本不变,耗电功率变化不大。由于风机、水泵、压缩机在采用变频调速后,可以节省大量电能,所需的投资在较短的时间内就可以收回,因此在这一领域中变频调速应用的最多。目前应用较成功的有恒压供水、各类风机、中央空调和液压泵的变频调速。

### 2. 在自动化控制系统方面的应用

由于变频器内置有 32 位或 16 位的微处理器,具有多种算术逻辑运算和智能控制功能,输出频率精度高达 0.01% ~ 0.1%,还设置有完善的检测、保护环节。因此,变频器在自动化控制系统中获得了广泛的应用,如化纤工业中的卷绕、拉伸、计量、导丝,玻璃工业中的平板玻璃退火炉、玻璃窑搅拌、拉边机、制瓶机,电弧炉的自动加料、配料系统以及电梯的智能控制等。

### 3. 在产品工艺和质量方面的应用

变频器还可以广泛用于传送、起重、挤压和机床等各种机械设备控制领域,它可以提高工艺水平和产品质量,减少设备的冲击和噪声,延长设备的使用寿命。采用变频调速控制可使机械系统得到简化,操作和控制更加方便,有的甚至可以改变原有的工艺规范,从而提高了整个设备的功能。

## 第2章 变频器的原理与控制方式

### 2.1 变频器的基本工作原理

变频调速就是通过改变电动机的定子供电频率，以平滑地改变电动机转速。当频率 $f$ 在 $0 \sim 50\text{Hz}$ 的范围内变化时，电动机转速的调节范围非常宽，在整个调速过程中都可以保持有限的转差功率，具有高精度、高效率的调速性能。

由电动机基本理论可以知道，三相异步电动机的转速表达式为

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

式中， $n$ 为异步电动机的转速； $f$ 为异步电动机的定子频率； $s$ 为电动机的转差率； $p$ 为电动机极对数。

由上式可知，转速 $n$ 与频率 $f$ 成正比，只要改变频率 $f$ 即可改变三相异步电动机的转速。但是由于异步电动机电动势公式为

$$E_1 = 4.44fN\Phi_m \approx U_1$$

式中， $E_1$ 为定子每相绕组感应电动势的有效值； $f$ 为定子频率； $N$ 为定子每相绕组的有效匝数； $\Phi_m$ 为每极磁通； $U_1$ 为定子电压。

因此，定子电压与磁通和频率成正比，当 $U_1$ 不变时， $f$ 和 $\Phi_m$ 成反比， $f$ 的升高势必导致磁通的降低。通常电动机是按 $50\text{Hz}$ 的频率设计制造的，其额定转矩也是在这个频率范围内给出的。当变频器频率调到大于 $50\text{Hz}$ 时，电动机产生的转矩要以和频率成反比的线性关系下降。为了有效维持磁通的恒定，必须在改变频率时同步改变电动机电压 $U_1$ ，即保持 $U_1$ 与 $f$ 成比例变化。

对进行电动机调速时，为保持电动机的磁通恒定，需要对电动机的电压与频率进行协调控制。对此，需要考虑基频（额定频率）以下和基频以上两种情况。

基频，即基本频率 $f_1$ ，是变频器对电动机进行恒转矩控制和恒功率控制的分界线。基本频率是按电动机的额定电压（指额定输出电压，是变频器输出电压中的最大值，通常它总是和输入电压相等）进行设定的，即在大多数情况下，额定输出电压就是变频器输出频率等于基本频率时的输出电压值，因此，基本频率又等于额定频率 $f_N$ （即与电动机额定输出电压对应的频率）。

在对异步电动机进行变压变频调速时，通常在基频以下采用恒转矩调速，在基频以上采用恒功率调速。

由式 $E_1 = 4.44fN\Phi_m \approx U_1$ 可见， $\Phi_m$ 的值是由 $E_1$ 和 $f_1$ 共同决定的，对 $E_1$ 和 $f_1$ 进行适当的控制，就可以使气隙磁通 $\Phi_m$ 保持额定值不变，具体分析如下。

1) 基频以下的恒磁通变频调速。这是考虑从基频（电动机额定频率 $f_N$ ）向下调速的情况。为了保持电动机的负载能力，应保持气隙主磁通 $\Phi_m$ 不变，这就要求在降低供电频率的同时降低感应电动势，保持 $E_1/f_1 = \text{常数}$ ，即保持电动势与频率之比为常数。这种控制又称

为恒磁通变频调速，属于恒转矩调速方式。

但是， $E_1$  难于被直接检测和直接控制。当  $E_1$  和  $f_1$  的值较高时，定子的漏抗压降相对比较小，如忽略不计，则可以近似地保持定子相电压  $U_1$  和频率  $f_1$  的比值为常数，即认为  $U_1 = E_1$ ，因此保持  $U_1/f_1$  为常数即可，这就是恒压频比控制方式，是近似的恒磁通控制。

当频率较低时， $U_1$  和  $E_1$  都较小，定子漏抗压降（主要是定子电阻压降）不能再忽略。在这种情况下，可以人为地适当提高定子电压以补偿定子电压降的影响，使气隙磁通基本保持不变。 $U/f$  的控制关系如图 2-1 所示，其中曲线 1 为  $U_1/f_1 = C$  ( $C$  为常数) 时的电压、频率关系；曲线 2 为有电压补偿时（近似  $U_1/f_1 = C$ ）时的电压、频率关系。实际装置中  $U_1$  与  $f_1$  的函数关系并不简单的如曲线 2 表示。通用变频器中  $U_1$  与  $f_1$  之间的函数关系有很多种，可以根据负载性质和运行状况加以选择。

2) 基频以上的弱磁变频调速。这是考虑由基频开始向上调速的情况。频率由额定值  $f_{1N}$  向上增大，但电压  $U_1$  受额定电压  $U_{1N}$  的限制不能再升高，只能保持  $U_1 = U_{1N}$  不变。这样必然会使主磁通随着  $f_1$  的上升而减小，相当于直流电动机弱调速的情况，属于近似的恒功率调速方式。

综合上述两种情况，异步电动机变频调速的基本控制方式如图 2-2 所示。

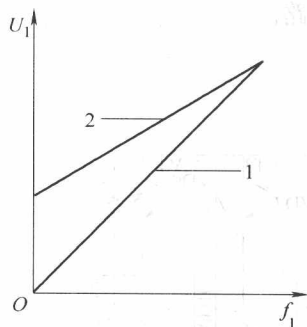


图 2-1  $U_1/f_1$  的控制关系

1— $U_1/f_1 = C$  ( $C$  为常数) 时的电压—频率关系

2—有电压补偿时（近似的  $U_1/f_1 = C$ ,  $C$  为常数）

的电压—频率关系

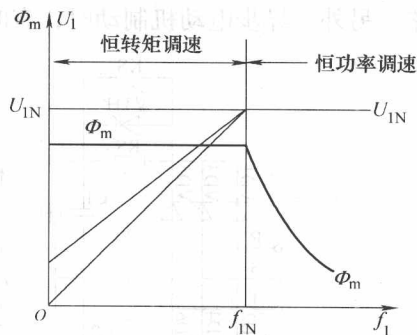


图 2-2 基本控制方式

由上面的分析可知，异步电动机的变频调速必须按照一定的规律同时改变其定子电压和频率，即必须通过变频装置获得电压和频率均可调节的供电电源，实现所谓的 VVVF 调速控制。变频器可适应这种异步电动机变频调速的基本要求。

## 2.2 变频器的组成

变频器主要由主电路和控制电路组成。主电路是给异步电动机提供调压变频电源的电力变换部分，主要包括三部分：将工频电源变换为直流电的整流电路，吸收在变流器和逆变器中产生的电压脉动的中间电路，以及将直流电变换为交流电的逆变电路，如图 2-3 所示。中间电路包括滤波电路、限流电路和制动电路等；控制电路主要包括主控制电路、信号检测电路、门极驱动电路、保持电路、外部接口电路和操作显示电路等。这些电路随着电力电子、微机控制技术的发展而不断更新，使得变频器得到进一步发展。



异步电动机的调压调频电源通常由变频器主电路（IGBT、BJT 或 GTO 做逆变器件）提供此电源输出的电压或电流及频率，由控制电路的控制指令进行控制，而控制指令则根据外部的运转指令进行运算获得。对于需要更精密速度或快速响应的场合，运算还应包含由变频器主电路和传动系统检测出来的信号和保护电路信号，即防止由于变频器主电路的过电压、过电流引起的损坏外，还应保护异步电动机及传动系统等。

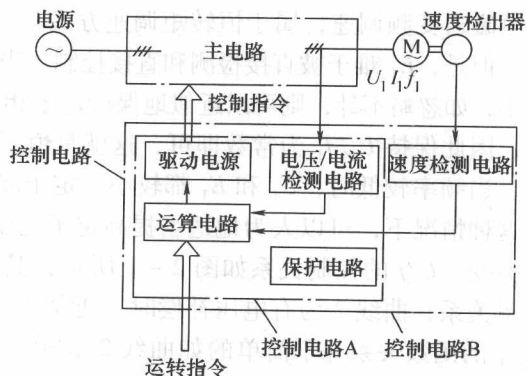


图 2-3 变频器简化结构

### 2.2.1 主电路

给异步电动机提供调压调频电源的电力变换部分，称为主电路。图 2-4 示出了典型的电压逆变器的例子，其主电路由四部分构成，将工频电源变换为直流电的整流电路，滤波限流电路，吸收在整流和逆变时产生的电压脉动的中间电路，以及将直流电变换为交流电的逆变电路。另外，异步电动机制动时，有时要附加制动电路。

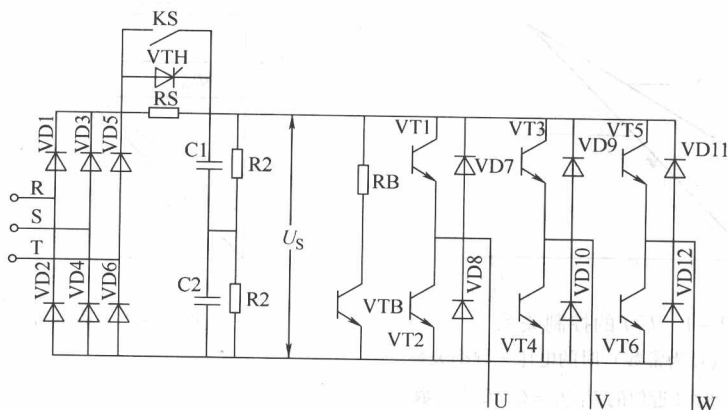


图 2-4 典型电压逆变器的主电路

#### 1. 整流电路

整流电路的主要作用是把三相（或单相）交流电转变成直流电，为逆变电路提供所需的直流电源。

常用三相变频器的整流电路由三相全波整流桥组成，一般是与三相交流电源连接。整流电路的主要作用是对工频外部电源进行整流，并给逆变电路和控制电路提供所需要的直流电源。整流电路按其控制方式可以是直流电压源，也可以是直流电流源。

整流器有两种基本类型：可控型和不可控型。不可控整流器基本上是由二极管组成，基于 PWM 变频器；可控整流器是利用晶闸管作为换流器件构成的晶闸管整流桥。

#### 2. 滤波及限流电路

滤波电路通常由若干个电解电容并联成一组，如图 2-4 中 C1 和 C2。为了解决电容 C1 和 C2 均压问题，在两电容旁各并联一个阻值相等的均压电阻 R1 和 R2。



图2-4中串接在整流桥和滤波电容之间的限流电阻 $R_S$ 和短路开关(虚线所示开关)组成了限流电路。当变频器接入电源的瞬间,将有一个很大的冲击电流经整流桥流向滤波电容,整流桥可能因电流过大而在输入电源的瞬间受到损坏。限流电阻 $R_S$ 可以削弱该冲击电流,起到保护整流桥的作用。在许多新的变频器中 $R_S$ 已被晶闸管替代。

### 3. 中间电路

整流电路可以将电网的交流电源整流成直流电压或直流电流,但这种电压或电流含有频率为6倍电源频率的波纹,并且逆变电路也会产生波纹来影响直流电压或电流。此外,由于异步电动机为感性负载,在直流电到频率可控的交流电变换中需要储能元件。

直流中间电路的作用是对整流电路的输出进行滤波平滑,以保证逆变电路和控制电源能够得到质量较高的直流电源。当整流电路是电压源时(即电压型变频器),直流中间电路的主元件是大容量的电解电容,而当整流电路是电流源时(即电流型变频器)平滑电路则主要由大容量电感组成,如图2-5和图2-6所示。此外,由于电动机制动的需要,直流中间电路中有时还包括制动电阻以及其他辅助电路。

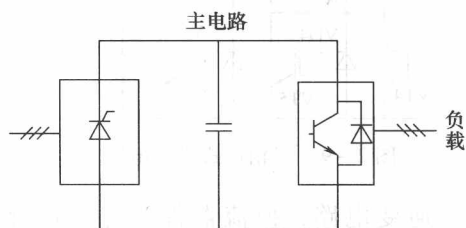


图2-5 电压型变频器

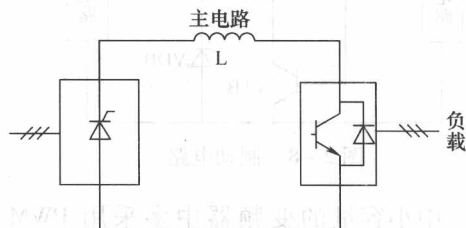


图2-6 电流型变频器

在电路通电瞬间,电容的充电电源(浪涌电流)很大,如果不限制这种大电流会损坏整流电路的二极管,这就需要设计一个限流电路。如图2-7所示,常见的限流电路包括串联直流电感和串联限流电阻。当充电电流瞬时增大时,直流电感产生感应电动势来阻止充电电流的增大,当电路稳定后,电感的作用就近似于一根导线,如图2-7a所示。为了限制大电流可采用电阻,当电路达到稳定状态时就可以接通开关,将电阻短路,如图2-7b所示。

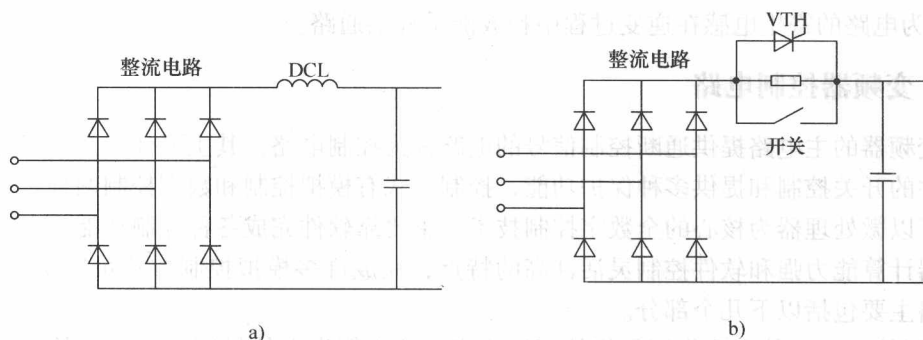


图2-7 典型限流电路

a) 串联直流电感 b) 串联限流电阻

有时为了对异步电动机进行制动,还需要在主电路中设计一个制动电路,它主要是通过一个制动电阻吸收电动机的再生能量。如图2-8所示,制动电路在整流器和逆变器之间,