

高职高专规划教材

变频器原理及应用

王廷才 王伟 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高职高专规划教材

变频器原理及应用

主 编 王廷才 王 伟
参 编 王崇文 高继贤
 霍大勇
主 审 范玉璋



机械工业出版社

本书内容主要包括：电力电子器件简介，变频器的基本组成原理，电动机变频调速机械特性，变频器的控制方式，变频调速系统主要电器的选用，变频器的操作、运行、安装、调试、维护及抗干扰，变频器在风机、水泵、中央空调、空气压缩机、提升机等方面的应用实例等。

全书内容结构合理、通俗易懂，没有高深的理论分析及数学运算，从实用的角度列举了多种应用实例，具有很高的参考价值。本书可作为高职高专院校电气工程与自动化专业、机电专业、自动控制专业及相关专业的教材，也可供机电技术和电气技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

变频器原理及应用/王廷才，王伟主编. —北京：机械工业出版社，
2005.6

高职高专规划教材
ISBN 7-111-16522-5

I. 变... II. ①王... ②王... III. 变频器—高等学校：技术学校—教材 IV. TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 044279 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：王玉鑫 版式设计：张世琴 责任校对：张晓蓉

封面设计：陈沛 责任印制：石冉

保定市印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

787mm × 1092mm ¹/₁₆ · 14.75 印张 · 362 千字

定价：22.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话（010）68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是高职高专规划教材，可作为大专院校电气工程与自动化专业、机电专业、自动控制专业及相关专业的教材，也可供机电技术和电气技术人员参考。

变频器是将固定频率的交流电变换为频率连续可调的交流电的装置，其内部结构含有微处理器芯片，可以进行算术逻辑运算和信号处理，具有多种自动控制功能。变频器的问世，使电气传动领域发生了一场技术革命，即交流调速取代直流调速。交流电动机变频调速技术具有节能、改善工艺流程、提高产品质量和便于自动控制等诸多优势，被国内外公认为最有发展前途的调速方式。

本书内容主要包括：电力电子器件简介，变频器的基本组成原理，电动机变频调速机械特性，变频器的控制方式，变频调速系统主要电器的选用，变频器的操作、运行、安装、调试、维护及抗干扰，变频器在风机、水泵、中央空调、空气压缩机、提升机和物料传送等方面的应用实例等。全书内容深入浅出、结构合理、通俗易懂、实用性强。

本书由河南工业职业技术学院王廷才和王伟主编，其中第1~2章由王伟编写；第3~5章由郑州大学电气工程学院高继贤编写；第6~7章由北京理工大学王崇文编写；第8章由河南工业职业技术学院霍大勇编写；其余章节由王廷才编写。中原工学院范玉璋教授在百忙中仔细地审阅了全书，提出了许多宝贵的意见。在编写过程中，作者参阅了许多同行专家编著的文献，参考了部分变频器制造企业提供的产品资料，在此一并表示真诚的致谢。

限于编者水平，加之时间仓促，不足之处敬请广大读者批评指正。

编 者
2005年1月

目 录

前言	
第 1 章 概述	1
1.1 变频器技术的发展	1
1.2 变频器的基本类型	3
1.3 变频器的应用	7
本章小结	8
习题 1	8
第 2 章 电力电子器件	9
2.1 电力二极管 (PD)	9
2.2 晶闸管 (SCR)	11
2.3 门极可关断 (GTO) 晶闸管	15
2.4 电力晶体管 (GTR)	18
2.5 电力 MOS 场效应晶体管 (P-MOSFET)	21
2.6 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	25
2.7 MOS 控制晶闸管 (MCT)	28
2.8 静电感应晶体管 (SIT)	29
2.9 集成门极换流晶闸管 (IGCT)	30
2.10 智能功率模块 (IPM)	31
本章小结	33
习题 2	34
第 3 章 交-直-交变频技术	35
3.1 整流电路	35
3.2 中间电路	38
3.3 逆变电路的工作原理及基本形式	40
3.4 电压型逆变电路	42
3.5 电流型逆变电路	43
3.6 SPWM 控制技术	44
3.7 电流跟踪控制的 PWM 逆变器	47
3.8 电压空间矢量控制的 PWM 逆变器	48
本章小结	51
习题 3	51
第 4 章 交-交变频技术	52
4.1 单相输出交-交变频电路	52
4.2 三相输出交-交变频电路	55
4.3 矩形波交-交变频	57
本章小结	58
习题 4	58
第 5 章 电动机与拖动系统	59
5.1 异步电动机	59
5.2 异步电动机的机械特性与运行	63
5.3 负载的机械特性	67
5.4 拖动系统与传动机构	69
本章小结	70
习题 5	71
第 6 章 高(中)压变频器	72
6.1 高(中)压变频器概述	72
6.2 高(中)压变频器的主电路结构	75
本章小结	81
习题 6	81
第 7 章 变频器的控制方式	82
7.1 U/f 控制	82
7.2 转差频率控制 (SF 控制)	88
7.3 矢量控制 (VC)	92
7.4 直接转矩控制	98
7.5 单片机控制	98
本章小结	103
习题 7	103
第 8 章 变频器系统的选择与操作	104
8.1 变频器的原理框图与接线端子	104
8.2 变频器的频率参数及预置	109
8.3 变频器的主要功能及预置	112
8.4 变频器的选择	119
8.5 变频调速系统的主电路及电器选择	126
8.6 变频器系统的控制电路	131
8.7 变频器的操作与运行	136
8.8 外接给定电路	140

8.9 变频器与 PLC 的连接	142	10.1 变频调速技术在风机上的应用	176
8.10 变频器“1 控 X”切换技术	146	10.2 空气压缩机的变频调速及应用	180
8.11 变频器与 PC 的通信	147	10.3 变频器在供水系统节能中的应用	186
本章小结	154	10.4 中央空调的变频技术及应用	194
习题 8	154	10.5 中压变频器在潜油电泵中的应用	198
第 9 章 变频器的安装与维护	156	10.6 矿用提升机变频调速系统	200
9.1 变频器的储存与安装	156	10.7 变频器在液态物料传输中的应用	202
9.2 变频器的抗干扰	162	10.8 龙门刨床的变频调速	205
9.3 变频器系统的调试	166	本章小结	207
9.4 变频器的维护与检查	168	习题 10	208
9.5 变频器的常见故障与处理	172	附录	209
本章小结	174	附录 A 森兰变频器	209
习题 9	174	附录 B 风光变频器	221
第 10 章 变频器应用实例	176	参考文献	229

第 1 章 概 述

变频器是将固定频率的交流电变换为频率连续可调的交流电的装置。变频器的问世，使电气传动领域发生了一场技术革命，即交流调速取代直流调速。交流电动机变频调速技术具有节能、改善工艺流程、提高产品质量和便于自动控制等诸多优势，被国内外公认为最有发展前途的调速方式。

1.1 变频器技术的发展

变频器技术随着微电子学、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，其应用越来越普及。

1.1.1 电力电子器件是变频器发展的基础

变频器的主电路不论是交-直-交变频还是交-交变频形式，都是采用电力电子器件作为开关器件。因此，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出现于 1956 年的晶闸管，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，所以也称为半控器件。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可关断（GTO）晶闸管和电力晶体管（GTR）为代表，在 20 世纪 60 年代发展起来的。这两种是电流型自关断器件，可方便地实现逆变和斩波，然而，其开关频率仍然不高，一般在 2kHz 以下。尽管这时已经出现了脉宽调制（PWM）技术，但因载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，使异步电动机在变频调速时产生刺耳的噪声，限制了变频器的推广应用。

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，栅极信号功率小，其开关频率可达到 20kHz 以上，采用 PWM 的逆变器谐波噪声大大降低。而且其电压和电流参数均已超过 GTR，因此变频器中的 IGBT 基本取代了 GTR，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。

第四代是以智能功率模块（IPM）为代表，IPM 是以 IGBT 为开关器件，但集成有驱动电路和保护电路。由 IPM 组成的逆变器只需对桥臂上各个 IGBT 提供隔离的 PWM 信号即可。而 IPM 的保护功能有过电流、短路、过电压、欠电压和过热等，还可以实现再生制动。简单的外部控制电路，使变频器的体积、重量和连线大为减少，而功能大为提高，可靠性也大为增加。

1.1.2 计算机技术和自动控制理论是变频器发展的支柱

早期的晶闸管逆变器各桥臂的开关控制是由分立电子元器件组成的电路完成的，还未采用计算机控制技术，不仅可靠性差、频率低，而且输出的电压和电流的波形是方波。

当 GTR 和 GTO 晶闸管问世并成为逆变器的电力电子器件时, PWM 技术也进入到应用阶段, 这时的逆变电路能够得到相当接近正弦波的输出电压和电流, 同时 8 位微处理器成为变频器的控制核心, 按压频比 (U/f) 控制原理实现异步电动机的变频调速, 使工作性能有了很大提高。

后来人们研制出 IGBT, 其优良的性能很快取代了 GTR, 进而广泛采用的是性能更为完善的 IPM, 使得变频器的容量和电压等级不断扩大和提高; 此外 16 位 (甚至 32 位) 微处理器取代了 8 位微处理器, 使变频器的功能也从单一的变频调速功能发展为包含算术逻辑运算及智能控制在内的综合功能; 自动控制理论的发展使变频器在改善压频比控制性能的同时, 推出了能实现矢量控制、直接转矩控制、模糊控制和自适应控制等多种模式。现代的变频器已经内置有参数辨识系统、PID 调节器、PLC 和通信单元等, 根据需要可实现拖动不同负载、宽调速和伺服控制等多种应用。

1.1.3 市场需求是变频器发展的动力

直流电动机和交流电动机先后诞生于 19 世纪, 距今已有 100 多年的历史, 已成为动力机械的主要拖动装置, 在推进工业现代化方面发挥着巨大的作用。一般在不要求变速或对调速性能要求不高的场合采用的是交流电动机, 而在调速性能要求较高的拖动系统中则采用直流电动机。

直流调速系统具有良好的调速性能, 因此在过去很长一段时间内被广泛地使用。直流调速系统的优点主要表现在调速范围广、稳定性好和过载能力强等技术指标上, 特别是在低速时仍能得到较大的过载能力, 是其他调速系统无法比拟的。但直流调速系统也有着不可回避的弱点, 主要表现在直流电动机结构复杂, 要消耗大量有色金属, 且换向器及电刷维护保养困难、寿命短、效率低等。

交流电动机结构简单, 造价低廉, 运行控制比较方便, 在工农业生产中得到广泛的应用。但在过去很长一段时间内, 由于没有变频电源, 异步电动机只能工作在不要求变速或对调速性能要求不高的场合。

变频器的问世为交流电动机的调速提供了契机, 不仅可取代结构复杂、价格昂贵的直流电动机调速, 而且原来由交流电动机拖动的负载实现变频调速后能节省大量的能源。

据 1993 年调查统计, 全国各类电动机装机容量约为 $3.5 \times 10^8 \text{ kW}$, 其耗电量约占全国发电量的 60%。其中大多数电动机长时间处于轻载运行状态。特别是其中装机容量占总装机容量一半以上的风机、泵类负载的电动机, 70% 采用风挡或阀门调节流量, 运行状态更差。这些电动机用电量占全国用电量的 31%, 占工业用电量的 50%。若在此类负载上使用变频调速装置, 将可节电 30% 左右。

估计现在全国电动机的装机容量有 $5 \times 10^8 \text{ kW}$, 按一半为风机、泵类负载计算, 有 $2.5 \times 10^8 \text{ kW}$ 。如果将其中的 40% 进行变频调速改造, 就节能 $1 \times 10^8 \text{ kW}$ 。目前我国已使用的变频器总容量大约为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^7 \text{ kW}$, 可见, 我国潜在的变频器应用市场是非常大的。

变频器作为商品在国内上市, 是近 10 年的事, 但销售额呈逐年增加趋势, 销售前景十分看好, 据有关资料报道, 我国 2003 年变频器的销售额已突破 30 亿元。目前阻碍变频器推广应用的主要原因仍然是价格偏高; 其次是对一般电气技术人员来说, 变频器的开发应用还具有一定的难度。但是随着科技的进步, 变频器的价格会逐年降低, 学习掌握变频器技术的人员也会越来越多, 变频器全面推广应用的年代已经不远了。

1.1.4 变频器的的发展趋势

在进入 21 世纪的今天，电力电子器件的基片已从 Si（硅）变换为 SiC（碳化硅），这使电力电子器件进入到高电压大容量化、高频化、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，这些与变频器相关的技术将影响其发展的趋势。

1. 网络智能化

智能化的变频器安装到系统后，不必进行那么多的功能设定，就可以方便地操作使用，有明显的工作状态显示；而且能够实现故障诊断与故障排除，甚至可以进行部件自动转换。利用互联网可以遥控监视，实现多台变频器按工艺程序联动，形成最优化的变频器综合管理控制系统。

2. 专门化

根据某一类负载的特性，有针对性地制造专门化的变频器，这不但利于对负载的电动机进行经济有效的控制，而且可以降低制造成本。例如：风机、水泵专用变频器、超重机械专用变频器、电梯控制专用变频器、张力控制专用变频器和空调专用变频器等。

3. 一体化

变频器将相关的功能部件，如参数辨识系统、PID 调节器、PLC 和通信单元等有选择地集成到内部组成一体化机，不仅使功能增强，系统可靠性增加，而且可有效缩小系统体积，减少外部电路的连接。据报道，现在已经研制出变频器和电动机的一体化组合机，从而使整个系统体积更小，控制更方便。

4. 环保无公害

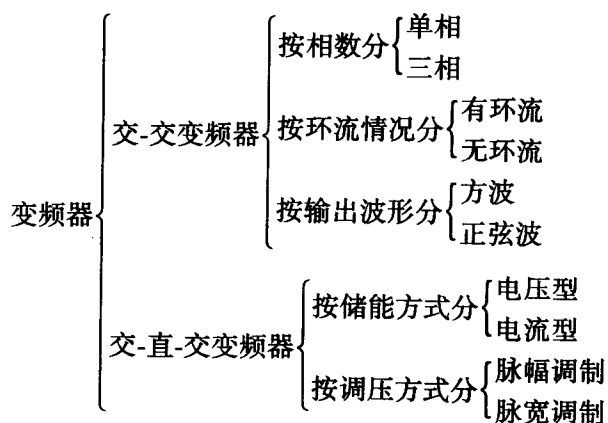
保护环境，制造“绿色”产品是人类的新理念。今后的变频器将更侧重于节能和低公害，即尽量减少使用过程中的噪声和谐波对电网及其他电气设备的污染干扰。

总之，变频器技术的发展趋势是朝着智能、操作简便、功能健全、安全可靠、环保低噪、低成本和小型化的方向发展。

1.2 变频器的基本类型

变频器的种类很多，下面根据不同的分类方法对变频器进行简单介绍。

1.2.1 按变频的原理分类



1. 交-交变频器

单相交-交变频器的原理框图如图 1-1a 所示。它只有一个变换环节就可以把恒压恒频 (CVCF) 的交流电源转换为变压变频 (VVVF) 的电源, 因此, 称为直接变频器, 或称为交-交变频器。

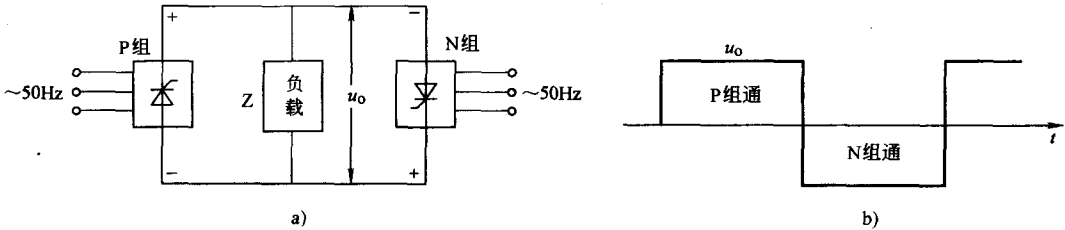


图 1-1 单相交-交变频器及其方波电路

电路由 P (正) 组和 N (负) 组反并联的晶闸管变流电路构成, 两组变流电路接在同一个交流电源, Z 为负载。两组变流器都是相控电路, P 组工作时, 负载电流自上而下, 设为正向; N 组工作时, 负载电流自下而上, 为负向。让两组变流器按一定的频率交替工作, 负载就得到该频率的交流电, 如图 1-1b 所示。改变两组变流器的切换频率, 就可以改变输出到负载上的交流电压频率, 改变交流电路工作时的触发延迟角 α , 就可以改变交流输出电压的幅值。

对于三相负载, 其他两相也各用一套反并联的可逆电路, 输出平均电压相位依次相差 120° 。这样, 如果每个整流电路都用桥式, 共需 36 个晶闸管。因此, 交-交变频器虽然在结构上只有一个变换环节, 但所用的器件多, 总设备投资大。另外, 交-交变频器的最大输出频率为 30Hz, 其应用受到限制。

2. 交-直-交变频器

交-直-交变频器又称为间接变频器, 它是先将工频交流电通过整流器变成直流电, 再经逆变器将直流电变成频率和电压可调的交流电。图 1-2 所示为交-直-交变频器的原理框图。

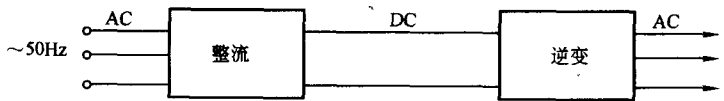


图 1-2 交-直-交变频器的原理框图

交-直-交变频器根据直流环节的储能方式的不同, 又分为电压型和电流型两种。

(1) 电压型变频器 在电压型变频器中, 整流电路产生的直流电压, 通过电容进行滤波后供给逆变电路。由于采用大电容滤波, 故输出电压波形比较平直, 在理想情况下可以看成是一个内阻为零的电压源, 逆变电路输出的电压为矩形波或阶梯波。电压型变频器多用于不

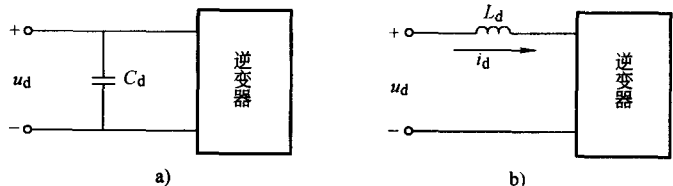


图 1-3 电压型和电流型变频器的主电路结构

a) 电压型变频器 b) 电流型变频器

要求正反转或快速加减速的通用变频器中。电压型变频器的主电路结构如图 1-3a 所示。

(2) 电流型变频器 当交-直-交变频器的中间直流环节采用大电感滤波时, 直流电流波

形比较平直，因而电源内阻很大，对负载来说基本上是一个电流源，逆变电路输出的电流为矩形波。电流型变频器适用于频繁可逆运转的变频器和大容量的变频器中。电流型变频器的主电路结构如图 1-3b 所示。

根据调压方式的不同，交-直-交变频器又分为脉幅调制和脉宽调制两种。

1) 脉幅调制 (PAM)。PAM (Pulse Amplitude Modulation) 方式，是一种改变电压源的电压 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，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 1-4 所示。

2) 脉宽调制 (PWM)。PWM (Pulse Width Modulation) 方式，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。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 1-5 所示。

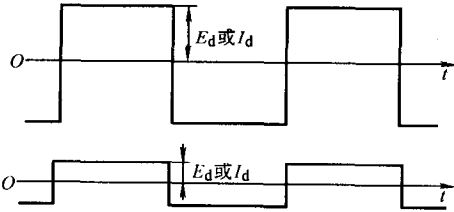


图 1-4 用 PAM 方式调压

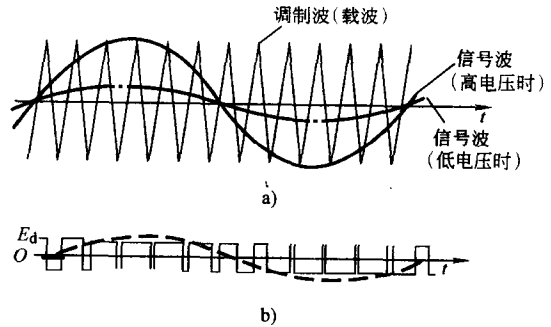


图 1-5 用 PWM 方式调压输出的波形

a) 调制原理 b) 输出电压波形

1.2.2 按变频器的控制方式分类

1. U/f 控制变频器

U/f 控制即压频比控制。它的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。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。采用这种控制方式，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设定，从而达到在调速控制的同时也使输出转矩得到控制。该方式是闭环控制，故与 U/f 控制相比，调速精度与转矩特性较优。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，并需依据电动机特性调节转差，故通用性较差。

3. VC 变频器

VC (Vector Control) 即矢量控制，是 20 世纪 70 年代由德国 Blaschke 首先提出来的对交流电动机一种新的控制思想和控制技术，也是异步电动机的一种理想调速方法。VC 的基本思想是将异步电动机的定子电流分解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。由于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，故这种控制方式被称为 VC。

VC 方式使异步电动机的高性能成为可能。VC 变频器不仅在调速范围上可以与直流电

动机相匹敌，而且可以直接控制异步电动机转矩的变化，所以已经在许多需要精密或快速控制的领域得到应用。

由于在进行 VC 时需要准确地掌握电动机的有关参数进行微机运算，故 VC 变频器最好采用厂家指定的专有电动机配套使用。但是，随着变频调速理论和技术的发展以及现代控制理论在现代变频器中的成功应用，目前在新型 VC 变频器中已经增加了“参数自调整”功能。带有这种功能的变频器在驱动异步电动机进行正常运转之前，可以自动地对电动机的参数进行辨识，并根据辨识结果调整控制算法中的有关参数。从而使 VC 变频器可以使用普通电动机，进一步实现了 VC 变频器的通用化。

1.2.3 按用途分类

对于多数用户来说，可能更为关心的是变频器的用途，下面我们根据用途的不同对变频器进行分类。

1. 通用变频器

顾名思义，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。它们分别具有以下特点：

简易型通用变频器是一种以节能为主要目的而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。

高性能的多功能通用变频器在设计过程中充分考虑了在变频器应用中可能出现的各种需要，并为满足这些需要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、电动车辆等对调速系统的性能有较高要求的场合。

过去，通用变频器基本上采用的是电路结构比较简单的 U/f 控制方式，与 VC 方式相比，在转矩控制性能方面要差一些。但是，随着变频技术的发展，目前一些厂家已经推出采用 VC 的通用变频器，以适应竞争日趋激烈的变频器市场的需求。这种多功能通用变频器可以根据用户需要切换为“ U/f 控制运行”或“VC 运行”，但价格方面却与 U/f 控制方式的通用变频器持平。因此，可以相信，随着电力电子技术和计算技术的发展，今后变频器的性能价格比将会不断提高。

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。

高性能专用变频器主要是采用 VC 方式，另有 20 世纪 90 年代后期直接转矩控制 (DTC) 方式开始实用化。例如：1998 年“宝钢”引进的瑞典 ABB 公司的线材轧机，用 DTC 变频器，电动机功率为 400 ~ 650kW。此外，高性能专用变频器往往是为了满足特定产

业的需要,使变频器在工作中能发挥出最佳性能价格比而设计生产的。例如:在冶金行业,是针对可逆轧机的高速性;在数控机床主轴驱动专用变频器中,为了便于和数控装置配合,要求缩小体积做成整体化结构;其他如电梯、地铁车辆等均要满足其特殊要求。

(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 180 000r/min。

(3) 高压变频器 高压变频器一般是大容量的变频器,最高功率可做到 5 000kW,电压等级为 3kV、6kV、10kV。

高压大容量变频器主要有两种结构形式:一种是由低压变频器通过升降压变压器构成,称为“高-低-高”式变压变频器,亦称为间接式高压变频器;另一种采用大容量 GTO 晶闸管或集成门极换流晶闸管(IGCT)串联方式,不经变压器直接将高压电源整流为直流,再逆变输出高压,称为“高-高”式高压变频器,亦称为直接式高压变频器。

1.3 变频器的应用

变频调速已被公认为最理想、最有发展前途的调速方式之一,它的应用主要在以下几个方面。

1. 变频器在节能方面的应用

风机、泵类负载采用变频调速后,节电率可以达到 20%~60%,这是因为风机、泵类负载的耗电功率基本与转速的三次方成比例。当用户需要的平均流量较小时,风机、泵类采用变频调速使其转速降低,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。据统计,风机、泵类电动机用电量占全国用电量的 31%,占工业用电量的 50%。在此类负载上使用变频调速装置具有非常重要的意义。以节能为目的变频器的应用,在最近十几年来发展非常迅速,据有关方面统计,我国已经进行变频调速改造的风机、泵类负载的容量约占总容量的 5%以上,年节电约 4×10^{10} kW·h。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。特别值得指出的是恒压供水,由于使用效果很好,现在已形成典型的变频控制模式,广泛应用于城乡生活用水、消防、喷灌等。恒压供水不仅节省大量电能,而且延长了设备的使用寿命,使用操作也更加方便。一些家用电器,如冰箱、空调采用变频调速,也取得了很好的节能效果。

2. 变频器在自动化系统中的应用

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 0.1%~0.01%,还设置有完善的检测、保护环节,因此在自动化系统中获得广泛的应用。例如,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;电弧炉自动加料、配料系统以及电梯的智能控制等。

3. 变频器在提高工艺水平和产品质量方面的应用

变频器还可以广泛应用于传送、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

后,使机械系统简化,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。例如,纺织和许多行业用的定型机,机内温度是靠改变送入热风的多少来调节的。输送热风通常用的是循环风机,由于风机速度不变,送入热风的多少只有用风门来调节。如果风门调节失灵或调节不当就会造成定型机失控,从而影响成品质量。循环风机高速起动,传送带与轴承之间磨损非常厉害,使传送带变成了一种易耗品。在采用变频调速后,温度调节可以通过变频器自动调节风机的速度来实现,解决了产品的质量;此外,变频器很方便地实现风机在低频低速下的起动问题,减少了传送带与轴承的磨损,延长了设备的寿命,同时可以节能 40%。

本章小结

1. 变频器的发展

电力电子器件是变频器发展的基础,计算机技术和自动控制理论是变频器发展的支柱。电力电子器件由最初的半控器件 SCR,发展为全控器件 GTO 晶闸管、GTR、MOSFET、IGBT,近年来又研制出 IPM,单个器件的电压值和电流值的定额越来越大,工作速度越来越高,驱动功率和管耗越来越小。变频器内部的核心控制由单片机完成,这些新技术和自动控制新理论使变频器的容量越来越大,功能越来越强。

市场需求也是变频器发展的动力,据测算我国潜在变频调速市场在 $1 \times 10^8 \text{ kW}$ 以上。

变频器技术的发展趋势为:智能化、专门化、一体化、环保低噪。

2. 变频器的基本类型

(1) 按变频的原理分类 交-交变频器、交-直-交变频器。

(2) 按变频器的控制方式分类 压频比 (U/f) 控制变频器、转差频率 (SF) 控制变频器、矢量控制 (VC) 变频器、直接转矩控制 (DTC) 变频器。

(3) 按用途分类 通用变频器、专用变频器。

3. 变频器的应用

变频调速已被公认为最理想、最有发展前途的调速方式之一,它的应用主要在节能、自动化系统及提高工艺水平和产品质量等方面。

习 题 1

1. 什么叫变频器?
2. 为什么说电力电子器件是变频器发展的基础?
3. 为什么说计算机技术和自动控制理论是变频器发展的支柱?
4. 变频器的发展趋势如何?
5. 按工作原理变频器分为哪几种类型?按用途变频器分为哪几种类型?
6. 交-交变频器与交-直-交变频器在主电路的结构和原理方面有何区别?两者中哪种变频器得到广泛应用?
7. 按控制方式变频器分为哪几种类型?
8. 简述变频器的应用。

第 2 章 电力电子器件

电力电子器件是组成变频器的关键器件，表 2-1 列出了当代应用的电力电子器件的类型。

表 2-1 电力电子器件的类型

类 型	器 件 名 称	代 号	
不可控器件	电力二极管 (Power Diode)	PD	
半控器件	晶闸管 (Thyristor)、可控硅整流器 (Silicon Controlled Rectifier)	T、SCR	
全控器件	电流控制器件	双极型晶体管 (Bipolar Transistor)、电力晶体管 (Grant Transistor)	BJT、GTR
		门极关断晶闸管 (Gate Turn-Off Thyristor)	GTO 晶闸管
	电压控制器件	电力场效应晶体管 (Power MOS Field-Effect Transistor)	P-MOSFET
		绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor)	IGBT
		集成门极换流晶闸管 (Integrated Gate Commutated Thyristor)	IGCT
		MOS 控制晶闸管 (MOS-Controlled Thyristor)	MCT
		静电感应晶体管 (Static Induction Transistor)	SIT
静电感应晶闸管 (Static Induction Thyristor)	SITH		
电力电子模块	智能功率模块 (Intelligent Power Module)	IPM	

2.1 电力二极管 (PD)

电力二极管是指可以承受高电压大电流具有较大耗散功率的二极管。电力二极管与普通二极管的结构、工作原理和伏安特性相似，但它的主要参数和选择原则等则不尽相同。

2.1.1 结构与伏安特性

1. 结构

电力二极管的内部是 PN 或 PIN 结构，是通过扩散工艺制作的。电力二极管和普通二极管一样，具有单向导电性。图 2-1a 为电力二极管的图形符号；图 2-1b 为螺旋式二极管的外形；图 2-1c 为平板式二极管的外形。

电力二极管引出两个极，分别称为阳极 A 和阴极 K。电力二极管功耗较大，它的外形有螺旋式和平板式两种。螺旋式二极管的阳极紧栓在散热器上；平板式二极管又分为风冷式和水冷式，它的阳极和阴极分别由两个彼此绝缘的散热器紧紧夹住。

2. 伏安特性

电力二极管的阳极和阴极间的电压和流过管子的电流之间的关系称为伏安特性，其伏安特性曲线如图 2-2 所示。

当从零逐渐增大正向电压时，开始阳极电流很小，这一段特性曲线很靠近横坐标轴。当正向电压大于 0.5V 时，正向阳极电流急剧上升，管子正向导通。如果电路中不接限流元

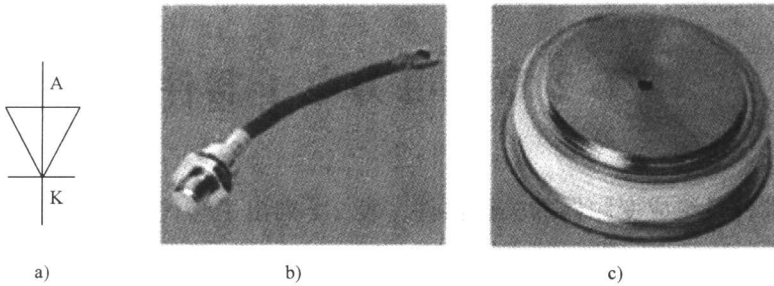


图 2-1 电力二极管的图形符号和外形

a) 电力二极管的图形符号 b) 螺旋式二极管的外形 c) 平板式二极管的外形

件，二极管将被烧毁。

当二极管加上反向电压时，起始段的反向漏电流也很小，而且随着反向电压的增加，反向漏电流只略有增加，但当反向电压增加到反向不重复峰值电压值时，反向漏电流开始急剧增加。如果对反向电压不加限制，那么二极管将被击穿而损坏。

电力二极管常用于将交流电变换为直流电的整流电路中，也常用于具有回馈或续流作用的逆变电路中。

按电力二极管的关断特性，可将其分为普通电力二极管和快速恢复电力二极管。快速恢复二极管在导通和截止过程中正向和反向恢复时间比普通二极管短得多，所以通常用于高频逆变器、高频整流器和缓冲电路中。

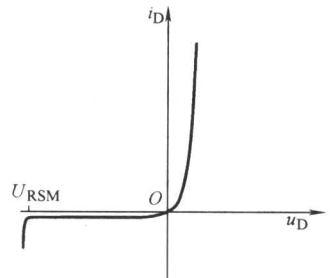


图 2-2 电力二极管的伏安特性曲线

2.1.2 主要参数

1. 正向平均电流 I_F

在规定环境温度（40℃）和标准散热条件下，当元件 PN 结温度稳定且不超过 140℃时，允许长时间连续流过 50Hz 正弦半波的电流平均值。将此电流值取规定系列的电流等级，即为器件的额定电流。

2. 反向重复峰值电压 U_{RRM}

在额定结温条件下，取器件反向伏安特性不重复峰值电压 U_{RSM} 值的 80% 称为反向重复峰值电压 U_{RRM} 。将 U_{RRM} 值取规定系列的电压等级就是该器件的额定电压。

3. 正向平均电压 U_F

在规定环境温度（+40℃）和标准散热条件下，当器件通过 50Hz 正弦半波额定正向平均电流时，器件阳极和阴极之间的电压平均值，取规定系列等级称为正向平均电压 U_F ，简称管压降，一般在 0.45~1V 范围内。

2.1.3 电力二极管的选用

1. 选择正向平均电流 I_F 的原则

在规定的室温和冷却条件下，只要所选的管子额定电流有效值 I_{DN} 大于管子在电路中可能流过的最大电流有效值 I_{DM} 即可。考虑到器件的过载能力较小，因此选择时考虑 1.5~2 倍的安全裕量，即

$$I_{DN} = 1.57I_F = (1.5 \sim 2) I_{DM}$$

所以

$$I_F = (1.5 \sim 2) \frac{I_{DM}}{1.57} \quad (2-1)$$

取相应标准系列值。

2. 选择反向重复峰值电压 U_{RRM} 的原则

选择电力二极管的反向重复峰值电压 U_{RRM} 的原则应为管子所工作的电路中可能承受的最大反向瞬时电压 U_{DM} 值的 2~3 倍, 即

$$U_{RRM} = (2 \sim 3) U_{DM} \quad (2-2)$$

取相应标准系列值。

3. 电力二极管使用注意事项

必须保证规定的冷却条件, 如不能满足规定的冷却条件, 必须降低容量使用。如规定风冷器件在自冷时使用, 只允许用到额定电流的 1/3 左右。

2.2 晶闸管 (SCR)

2.2.1 晶闸管的结构

晶闸管是四层 ($P_1N_1P_2N_2$) 三端 (A、K、G) 器件, 其内部结构和等效电路如图 2-3 所示。

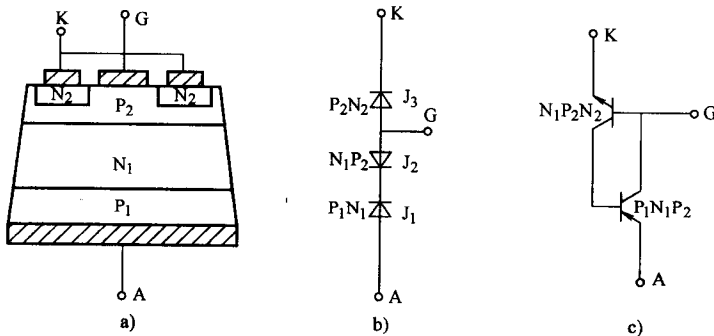


图 2-3 晶闸管的内部结构及等效电路

a) 芯片内部结构 b) 以 3 个 PN 结等效 c) 以互补晶体管等效

晶闸管的图形符号和外形如图 2-4a、图 2-4b 和图 2-4c 所示。晶闸管的外形有螺栓式和平板式。螺栓式容量一般为 10~200A; 平板式用于 200A 以上。当晶闸管工作时, 由于器件损耗而产生热量, 需要通过散热器来降低管芯温度。

2.2.2 晶闸管的导通和阻断控制

晶闸管的导通控制: 在晶闸管的阳极和阴极间加正向电压, 同时在它的门极和阴极间也加正向电压形成触发电流, 即可使晶闸管导通。

晶闸管一旦导通, 门极即失去控制作用, 因此门极所加的触发电压一般为脉冲电压。晶闸管从阻断变为导通的过程称为触发导通。门极触发电流一般只有几十毫安到几百毫安, 而晶闸管导通后, 从阳极到阴极可以通过几百、几千安的电。要使导通的晶闸管阻断, 必须将阳极电流降低到一个称为维持电流的临界极限值以下。