



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等职业技术教育机电类专业规划教材
机械工业出版社精品教材

变频器原理及应用

第3版

王廷才 主编



赠电子课件、习题
详解、模拟试卷等

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等职业技术教育机电类专业规划教材
机械工业出版社精品教材

变频器原理及应用

第 3 版

主 编 王廷才
副主编 杨聚庆
参 编 刘娇月 王香红
 毕新熙 韩艳赞
主 审 宋峰青



机械工业出版社

本书是综合各院校使用《变频器原理及应用第2版》所提出的建议,适应高等职业院校进行工学结合教学改革的需要,结合最新的变频器技术资料编写的。本书以突出应用、注重技能为宗旨,由浅入深地阐述了变频器的基本组成原理和控制方式,电动机变频调速机械特性,变频器常用控制电路,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、空气压缩机、水泵、中央空调系统、潜油电泵及提升机等方面的应用实例等内容。为方便教学,书中还编排有便于操作的实训课题。

本书内容通俗易懂,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。

本书可作为高等职业院校电气工程与自动化类、机电类、自动控制类及相关专业的教材,也可供从事机电技术和电气技术人员的参考。

为方便教学,本书配有免费电子课件、电子教案、模拟试卷及答案、授课指导、习题详解等,凡选用本书作为授课用书的教师,均可来电索取。咨询电话:010-88379375;电子邮箱:cmpgaozhi@sina.com。

图书在版编目(CIP)数据

变频器原理及应用/王廷才主编. —3版. —北京:机械工业出版社,2015. 2

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 高等职业技术教育机电类专业规划教材 机械工业出版社精品教材
ISBN 978-7-111-48488-2

I. ①变… II. ①王… III. ①变频器—高等职业教育—教材 IV. ①TN773

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第260913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:于宁 责任编辑:于宁 王宗锋

版式设计:赵颖喆 责任校对:张薇

封面设计:鞠杨 责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2015年1月第3版第1次印刷

184mm×260mm·15印张·362千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-48488-2

定价:32.00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 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前言

变频器问世于20世纪80年代,由于其具有节能、改善工艺流程、提高产品质量和便于自动控制等诸多优势,到21世纪初我国变频器的应用已具相当规模,而变频器应用的设计、安装、调试和维修的技术人员却比较匮乏。为尽快培养具有较高实践能力的紧缺人才,我们以“突出应用、注重技能、培养能力”为宗旨,编写了《变频器原理及应用》一书,于2005年由机械工业出版社出版,当年即被全国诸多院校选为教材,得到众多从事电气设备和电气自动化的工程技术人员的高度评价,翌年被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。2009年推出《变频器原理及应用第2版》,采用本教材的院校数量进一步扩大。为更好地适应高等职业院校进行工学结合教学改革的需要,我们综合各院校使用本书提出的建议,结合最新的变频器技术资料,编写了《变频器原理及应用第3版》,除了对原书内容进行了充实和调整外,还提供更丰富的教学资源。

本书主要内容有:变频器的认识,变频器常用电力电子器件,交-直-交变频技术,交-交变频技术,高(中)压变频器,变频器的接线端子与功能参数,变频器的控制方式,变频调速系统的选择与操作,变频器的安装与维护,变频器应用实例和变频器技术实训等。

本书由深圳信息职业技术学院王廷才任主编,河南工业职业技术学院杨聚庆任副主编。其中第1章、第10章和附录由杨聚庆编写,第2章和第3章由南阳市高级技工学校王香红编写,第5章由河南工业职业技术学院韩艳赞编写,第6章、第7章和第8章由河南工业职业技术学院刘娇月编写,第9章和第11章由河南天冠燃料乙醇有限公司毕新熙编写,其余由王廷才编写,并对全书统稿。深圳技师学院宋峰青高级技师在百忙中仔细地认真地审阅了全书,提出了许多宝贵的意见。编者在编写过程中参考了希望森兰科技股份有限公司和山东新风光电子科技发展有限公司等变频器制造企业提供的产品资料,在此一并表示诚挚谢意。

编者

目 录

前言

第 1 章 变频器的认识 1

1.1 变频器概述 1

1.1.1 变频器的发展 1

1.1.2 变频器的分类 3

1.1.3 变频器的应用 5

1.2 异步电动机变频调速原理 6

1.2.1 异步电动机变频调速机理 6

1.2.2 三相异步电动机的机械特性 6

1.2.3 三相异步电动机的变频起动 7

1.2.4 三相异步电动机的变频制动 7

1.3 变频器的结构与主要技术参数 8

1.3.1 变频器的外形 8

1.3.2 变频器的基本原理结构 9

1.3.3 变频器的铭牌 12

1.3.4 主要技术参数 12

本章小结 13

习题 1 13

第 2 章 变频器常用电力电子器件 14

2.1 功率二极管 14

2.1.1 功率二极管的结构与伏安特性 14

2.1.2 功率二极管的主要参数 15

2.1.3 功率二极管的选用 15

2.1.4 功率二极管的分类 16

2.2 晶闸管 16

2.2.1 晶闸管的结构 16

2.2.2 晶闸管的导通和阻断控制 17

2.2.3 晶闸管的阳极伏安特性 17

2.2.4 晶闸管的参数 18

2.2.5 晶闸管的门极伏安特性及 主要参数 18

2.2.6 晶闸管触发电路 19

2.2.7 晶闸管的保护 19

2.3 门极可关断(GTO)晶闸管 21

2.3.1 GTO 晶闸管的结构与 工作原理 21

2.3.2 GTO 晶闸管的特性与 主要参数 21

2.3.3 GTO 晶闸管的门极控制 22

2.3.4 GTO 晶闸管的缓冲电路 23

2.4 电力晶体管(GTR) 24

2.4.1 GTR 的结构 24

2.4.2 GTR 的参数 24

2.4.3 二次击穿现象 25

2.4.4 GTR 的驱动电路 25

2.4.5 GTR 的缓冲电路 26

2.5 功率 MOS 场效应 晶体管(P-MOSFET) 27

2.5.1 P-MOSFET 的结构 27

2.5.2 P-MOSFET 的工作原理 27

2.5.3 P-MOSFET 的特性 27

2.5.4 P-MOSFET 的主要参数 29

2.5.5 P-MOSFET 的栅极驱动 29

2.5.6 P-MOSFET 的保护 30

2.6 绝缘栅双极型晶体管(IGBT) 31

2.6.1 IGBT 的结构与基本

工作原理	31	本章小结	55
2.6.2 IGBT 的基本特性	31	习题4	55
2.6.3 IGBT 的主要参数	32	第5章 高(中)压变频器	56
2.6.4 IGBT 的驱动电路	33	5.1 高(中)压变频器概述	56
2.7 集成门极换流晶闸管(IGCT)	33	5.1.1 高(中)压变频器的分类	56
2.7.1 IGCT 的结构与工作原理	33	5.1.2 高(中)压变频调速系统的	
2.7.2 IGCT 的特点	34	基本形式	57
2.7.3 IGCT 变频器	35	5.1.3 高(中)压变频器的应用	57
2.8 智能功率模块(IPM)	36	5.1.4 高(中)压变频器的技术要求	58
2.8.1 IPM 的结构	36	5.2 高(中)压变频器的主电路结构	59
2.8.2 IPM 的主要特点	36	5.2.1 晶闸管电流型变频器	59
2.8.3 IPM 选择的注意事项	36	5.2.2 GTO 晶闸管电流型变频器	60
本章小结	38	5.2.3 IGBT 并联多重化 PWM	
习题2	38	电压型变频器	61
第3章 交-直-交变频技术	39	5.2.4 IGBT 三电平高(中)	
3.1 整流电路	39	压变频器	61
3.1.1 不可控整流电路	39	5.2.5 五电平高(中)压变频器	63
3.1.2 可控整流电路	40	5.3 风光 JD-BP37/38 系列高压	
3.2 中间电路	42	变频器简介	64
3.2.1 滤波电路	42	5.3.1 JD-BP37/38 系列高压	
3.2.2 制动电路	43	变频器的系统结构	64
3.3 逆变电路	44	5.3.2 JD-BP37/38 系列高压	
3.3.1 逆变电路的工作原理	44	变频器的柜体结构	66
3.3.2 逆变电路的基本形式	45	5.3.3 高压变频器的运行操作方式	67
3.4 SPWM 控制技术	46	5.4 高压变频器对电动机的	
3.4.1 概述	46	影响及防治措施	68
3.4.2 SPWM 控制的基本原理	46	5.4.1 输出谐波对电动机的	
3.4.3 SPWM 逆变电路的控制方式	48	影响及防治措施	68
3.4.4 SPWM 逆变器的调制方式	49	5.4.2 输出电压变化率对电动机的	
本章小结	49	影响及防治措施	68
习题3	50	5.4.3 共模电压对电动机的	
第4章 交-交变频技术	51	影响及防治措施	69
4.1 单相输出交-交变频电路	51	本章小结	69
4.1.1 电路组成及基本工作原理	51	习题5	69
4.1.2 感阻性负载时的相控调制	52	第6章 变频器的接线	
4.1.3 输入输出特性	53	端子与功能参数	71
4.2 三相输出交-交变频电路	54	6.1 变频器的外部连接端子	71
4.2.1 公共交流母线进线方式	54	6.1.1 主电路端子	72
4.2.2 输出星形联结方式	54	6.1.2 控制板端子及跳线	72
		6.1.3 控制端子的配线	74

6.2 变频器的主要功能参数及预置	75	8.1.3 依据电动机的类型 选用变频器	104
6.2.1 变频器运行模式功能参数	75	8.1.4 依据电动机的运行 方式选择变频器	107
6.2.2 变频器的运行功能参数	76	8.1.5 依据负载的机械特性 选择变频器	108
6.2.3 优化特性功能参数	79	8.1.6 变频器控制方式的选择	113
6.2.4 变频器的保护功能参数	82	8.2 变频调速系统的主电路及 电器选择	113
6.3 变频器的频率参数及预置	83	8.2.1 断路器	114
6.3.1 各种基本频率参数	84	8.2.2 接触器	115
6.3.2 变频器的其他频率参数	85	8.2.3 传感器	116
本章小结	86	8.2.4 输入交流电抗器	117
习题6	87	8.2.5 电源滤波器	118
第7章 变频器的控制方式	88	8.2.6 制动电阻及制动单元	119
7.1 U/f 控制	88	8.2.7 直流电抗器	120
7.1.1 U/f 控制原理	88	8.2.8 输出交流电抗器	120
7.1.2 恒 U/f 控制方式的机械特性	89	8.3 变频调速系统的控制电路	121
7.1.3 对额定频率 f_N 以下 变频调速特性的修正	91	8.3.1 变频器控制电路的主要组成	121
7.1.4 U/f 控制的功能	92	8.3.2 正转控制电路	121
7.2 转差频率控制	94	8.3.3 正、反转控制	123
7.2.1 转差频率控制原理	94	8.3.4 升速与降速控制	124
7.2.2 转差频率控制的系统构成	94	8.3.5 变频与工频切换的控制电路	124
7.3 矢量控制	95	8.4 变频器的程序控制	125
7.3.1 直流电动机与异步电动机 调速上的差异	95	8.4.1 利用变频器的编程 功能进行程序控制	125
7.3.2 矢量控制中的等效变换	96	8.4.2 多挡转速控制电路	126
7.3.3 直角坐标/极坐标变换	98	8.4.3 简易 PLC 运行功能	126
7.3.4 变频器矢量控制的基本思想	98	8.5 外接给定信号	127
7.3.5 使用矢量控制的要求	99	8.5.1 频率给定信号的种类	127
7.3.6 矢量控制系统的优点和 应用范围	100	8.5.2 选择给定方法的一般原则	128
7.4 直接转矩控制	100	8.5.3 频率给定线	128
7.4.1 直接转矩控制系统	101	8.6 变频器与 PLC 的连接	129
7.4.2 直接转矩控制的优势	101	8.6.1 PLC 概述	129
本章小结	101	8.6.2 PLC 与变频器连接时 要注意的问题	131
习题7	102	8.6.3 PLC 与变频器连接实现 多挡转速控制	133
第8章 变频调速系统的 选择与操作	103	8.7 变频器“1控X”切换技术	135
8.1 变频器的选择	103		
8.1.1 变频器电压等级的选择	103		
8.1.2 变频器容量的选择	103		

8.7.1 “1控X”工作过程	135	9.5.4 零部件更换	156
8.7.2 “1控3”供水电路原理图	135	9.5.5 变频器基本检测和测量方法	156
8.8 变频器与PC的通信	136	9.5.6 测量仪表简介	157
8.8.1 计算机与变频器的通信连接	136	9.5.7 变频器主电路的测量	158
8.8.2 SB70变频器的通信协议	137	9.6 变频器的常见故障与处理	160
8.8.3 变频器的数据格式	137	9.6.1 变频器常见故障诊断	160
8.8.4 变频器的波特率	137	9.6.2 变频器故障的处理	163
8.8.5 变频器参数编址	137	本章小结	164
8.8.6 通信中的数据类型	138	习题9	164
8.8.7 通信举例	138	第10章 变频器应用实例	165
本章小结	139	10.1 变频调速技术在风机上的应用	165
习题8	139	10.1.1 风机变频调速驱动机理	165
第9章 变频器的安装与维护	141	10.1.2 风机变频调速系统设计	166
9.1 变频器的储存与安装	141	10.1.3 节能计算	169
9.1.1 变频器的储存	141	10.2 空气压缩机的变频调速及应用	169
9.1.2 装设场所	141	10.2.1 空气压缩机变频调速机理	169
9.1.3 使用环境	141	10.2.2 空气压缩机加、卸载供气控制方式存在的问题	170
9.1.4 变频器安装对电源的要求	142	10.2.3 空气压缩机变频调速控制方式的设计	171
9.1.5 安装方向与空间	142	10.2.4 空气压缩机变频调速控制方式的安装调试	174
9.1.6 安装方法	143	10.2.5 空气压缩机变频调速后的效益	175
9.1.7 接线	143	10.3 变频器在供水系统节能中的应用	175
9.2 变频器的抗干扰	147	10.3.1 恒压供水的控制目的	175
9.2.1 变频器运行对电网的影响	147	10.3.2 水泵调速节能原理	176
9.2.2 变频器对电网影响的抑制	149	10.3.3 变频调速恒压供水系统	176
9.2.3 变频器对其他设备的干扰及抑制	149	10.3.4 变频调速恒压供水系统设计	178
9.2.4 电网对变频器干扰的防止	150	10.3.5 经济效益分析	183
9.3 变频器的接地与防雷	151	10.4 中央空调系统的变频技术及应用	184
9.3.1 变频器的接地	151	10.4.1 中央空调系统的组成	184
9.3.2 变频器的防雷	152	10.4.2 水泵节能改造的方案	185
9.4 变频器系统的调试	152	10.4.3 节能分析	187
9.4.1 通电前的检查	152	10.5 中压变频器在潜水电泵中的应用	188
9.4.2 通电检查	153		
9.4.3 空载试验	153		
9.4.4 带负载测试	154		
9.5 变频器的维护与检查	155		
9.5.1 维护注意事项	155		
9.5.2 日常检查与维护	155		
9.5.3 定期检查	155		

10.5.1	潜水电泵传统供电方式的不足	188	本章小结	195
10.5.2	潜水电泵改为变频调速的优点	188	习题 10	195
10.5.3	潜水电泵变频调速改造方案	189	第 11 章 变频器技术实训	197
10.6	矿用提升机变频调速系统	191	11.1 变频器的基本操作	197
10.6.1	使用矿用提升机系列变频器的优点	191	11.2 变频器运行操作模式及基本参数设置	201
10.6.2	矿用提升机变频调速系统的原理	191	11.3 U/f 控制曲线测试	202
10.6.3	变频调速系统对原调速系统的改造	192	11.4 外端子控制正、反转及点动运行操作	203
10.6.4	现场应用情况及运行效果	192	11.5 变频器正、反转运行控制电路安装与调试	205
10.7	变频器在液态物料传输中的应用	192	11.6 变频—工频切换电路安装与调试	206
10.7.1	液态物料上下传输系统组成及其传输程序	193	11.7 变频器—PLC 控制电路安装与调试	207
10.7.2	变频器控制液态物料上下传输系统	193	11.8 综合实训	209
10.7.3	应用范围及效果	195	附录	210
			附录 A 森兰变频器	210
			附录 B 风光变频器	224
			参考文献	232

变频器是将固定电压、固定频率的交流电变换为可调电压、可调频率交流电的装置。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,被国内外公认为是最有发展前途的调速方式。

1.1 变频器概述

变频器是组成变频调速系统的核心部件。变频调速系统具有调速精度高、动态响应快、运行效率高、节约能源、调速范围广和便于自动控制等诸多优势。近年来,变频调速系统已广泛应用于工业生产和日常生活的许多领域中。

1.1.1 变频器的发展

变频器是随着微电子学、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起来的。

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-交变频形式还是交-交变频形式,都是采用电力电子器件作为开关器件。变频器问世于 20 世纪 80 年代,初期的变频器主电路由晶闸管等分立电子元件组成,可靠性差、频率低,而且输出的电压和电流的波形是方波。随着电力晶体管(GTR)和门极可关断(GTO)晶闸管的出现并成为逆变器的功率器件,脉宽调制(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,在工作性能上有了很大提高。近年来人们陆续研制出绝缘栅双极晶体管(IGBT)和集成门极换流晶闸管(IGCT),以及性能更为完善的智能功率模块(IPM),使得变频器的容量和电压等级不断扩大和提高。

2. 变频器的发展得益于计算机技术和自动控制理论的支持

变频器的发展得益于计算机技术的支持。从 20 世纪 80 年代至今,计算机制造技术一直处于突飞猛进的发展阶段,变频器的中央处理单元从采用 8 位微处理器迅速升级为 16 位乃至 32 位微处理器,有的还使用了 DSP 系统,使变频器的功能从单一的变频调速发展为包含算术运算、逻辑运算及智能控制的综合功能。

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 控制器和通信单元等, 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。

3. 市场需求是变频器发展的动力

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使用。直流调速系统的优点主要表现在调速范围广、性能稳定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, 是其他调速方法无法比拟的。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调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, 不仅要取代结构复杂、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。

据调查统计, 全国各类电动机耗电量约占全国发电量的 70%。其中 80% 为异步电动机, 大多数电动机长时间处于轻载运行状态, 特别是风机、泵类负载的电动机。若在此类负载上使用变频调速装置, 将可节电 30% 左右。

目前, 变频器作为商品在国内的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, 在过去几年内我国变频器市场保持着 12%~15% 的增长率, 这一速度远远超过了近几年 GDP 的增长速度, 变频器已逐步进入全面推广应用的时期。

4. 变频器的发展趋势

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), 使电力电子新器件进入到高电压、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气设备正在开发研制之中, 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的发展将影响其发展趋势。

(1) 智能化 智能化的变频器安装到系统后, 不必进行太多的功能设定, 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, 这不但有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、水泵用变频器、起重机械专用变频器、电梯控制专用变频器、张力控制专用变频器和空调器专用变频器等。

(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 控制器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, 使整个系统体积更小, 控制更方便。

(4) 环保化 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。

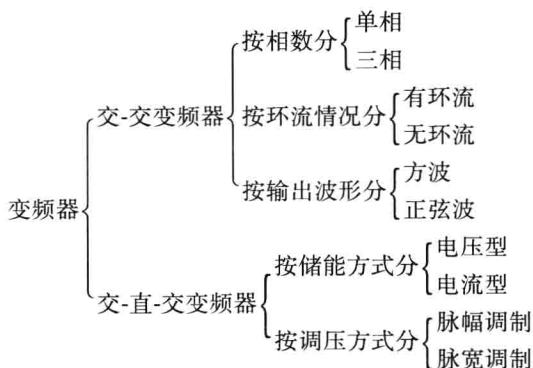
总之,变频器技术的发展趋势是朝着智能、操作简便、功能健全、安全可靠、环保低噪、低成本和小型化的方向发展。

1.1.2 变频器的分类

变频器的种类很多,下面根据不同的分类方法进行简单介绍。

1. 按原理分类

变频器按工作原理分类如下:



(1) 交-交变频器 交-交变频器只有一个变换环节,即把恒压恒频(CVCF)的交流电源转换为变压变频(VVVF)电源,称为直接变频器,或称为交-交变频器。

(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 1-1 所示为交-直-交变频器的原理框图。

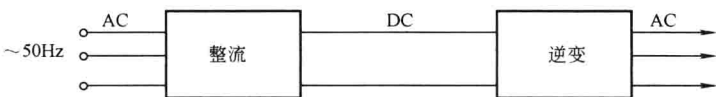


图 1-1 交-直-交变频器的原理框图

1) 交-直-交变频器根据直流环节的储能方式,又分为电压型和电流型两种,如图 1-2 所示。

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

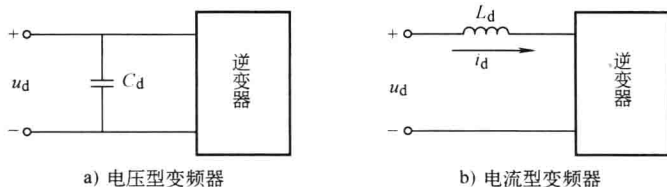


图 1-2 电压型和电流型变频器的主电路结构

电压为矩形波或阶梯波。电压型变频器多用于不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 1-2a 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,逆变电路输出的交流电流是矩形波。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。电流型变频器的主电路结构如图 1-2b 所示。

2) 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,整流器部分只控制输出电压或电流。采用PAM调节电压时,变频器的输出电压波形如图1-3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,即SPWM方式。用PWM方式调压输出的波形如图1-4所示。

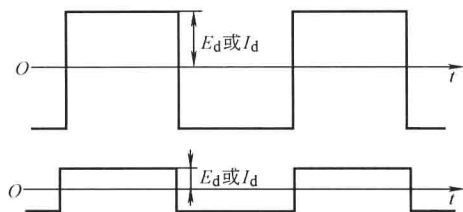


图1-3 用PAM方式调压

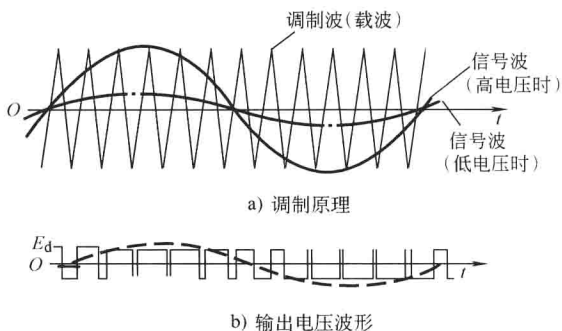


图1-4 用PWM方式调压输出的波形

2. 按控制方式分类

(1) U/f 控制变频器 U/f 控制又称为压频比控制。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。在额定频率以下,通过保持 U/f 恒定使电动机获得所需的转矩特性。这种方式的控制电路成本低,多用于精度要求不高的通用变频器。

(2) 转差频率控制变频器 转差频率控制也称为SF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。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) 矢量控制变频器 矢量控制(Vector Control)简称VC,是20世纪70年代由德国人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。矢量控制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。这种控制方式被称为矢量控制。

矢量控制方式使异步电动机的高性能成为可能。矢量控制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,所以已经在许多需精密或快速控制的领域得到应用。

(4) 直接转矩控制 直接转矩控制(Direct Torque Control)简称DTC,它是把转矩直接作为控制量来控制。直接转矩控制的优越性在于:控制转矩是控制定子磁链,在本质上并不需要转速信息;控制上对除定子以外的所有电动机参数变化,有良好的鲁棒性;所引入的定子磁链观测器能很容易估算出同步速度信息,因而能方便地实现无速度传感器化。

3. 按用途分类

对一般用户来说,更为关心的是变频器的用途,根据用途的不同,对变频器进行如下分类。

(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求的不断扩大,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;二是高性能多功能的通用变频器。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。

高性能多功能的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。

(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,异步电动机的矢量控制得到发展,矢量控制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和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,因此在要求高速、高精度的控制中,这种高性能交流伺服变频系统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用到高速电动机,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。高压变频器一般是大容量的变频器,最大功率可做到5000kW,电压等级为3kV、6kV和10kV。

高压大容量变频器主要有两种结构形式:一种是用低压变频器通过升降压变压器构成,称为“高-低-高”式高压变频器,亦称为间接式高压变频器;另一种采用大容量绝缘栅双极晶闸管或集成门极换流晶闸管串联方式,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。

1.1.3 变频器的应用

变频调速不仅具有卓越的调速性能,还具有显著的节能效果,它广泛应用于电力、石油、化工、建材、冶金、交通、纺织、化纤、造纸及公用工程(供水、水处理、中央空调、电梯)等领域中。

1. 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。

2. 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。

3. 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。

1.2 异步电动机变频调速原理

异步电动机结构简单、价格低廉、控制方便,在生产中有着广泛的应用。异步电动机按转子的结构不同,分为笼型异步电动机和绕线转子异步电动机两类;按使用的电源相数不同,分为单相和三相等几类。变频调速主要用于三相笼型异步电动机。

1.2.1 异步电动机变频调速机理

由电机学可知,三相交流异步电动机的同步转速(即定子旋转磁场转速) n_0 可表示为

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (1-1)$$

式中, f_1 为定子的频率; p 为电动机的磁极对数。

根据异步电动机的工作原理,异步电动机要产生转矩,同步转速 n_0 与转子转速 n 必须有差别。这个转速差($n_0 - n$)与同步转速 n_0 的比值 s 称为转差率,表示为

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (1-2)$$

由此,异步电动机的转速 n 的表达式为

$$n = n_0(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s) \quad (1-3)$$

异步电动机在额定状态运行时,转子转速 n 通常与 n_0 相差不大,因此额定转差率 s_N 一般都比较小,其范围在0.01~0.05之间。

如果将电源频率调节为 f_x ,则同步转速 n_{0x} 也随之调节成

$$n_{0x} = \frac{60f_x}{p} \quad (1-4)$$

异步电动机变频后的转速 n_x 的表达式为

$$n_x = n_{0x}(1 - s) = \frac{60f_x}{p}(1 - s) \quad (1-5)$$

由此式可见,调节电源频率 f_x ,可使异步电动机的转速 n_x 得到大范围的调节。这就是异步电动机变频调速的理论依据。

1.2.2 三相异步电动机的机械特性

当加在电动机上的电压 U_1 为额定电压时,电动机的电磁转矩 T 与转子转速 n 之间的关系称为电动机的机械特性,即

$$n = f(T)$$

三相异步电动机的机械特性曲线如图1-5所示。下面讨论曲线上几个特殊点的转矩。

1. 起动转矩 T_{st}

在 $n=0$ ($s=1$), $T=T_{st}$ 点, 这点的转矩称为起动转矩 T_{st} , 也称为堵转转矩。当电动机的负载转矩大于 T_{st} 时, 电动机将不能起动。

2. 额定转矩 T_N

在 $n=n_N$ ($s=s_N$), $T=T_N$ 点, 这点的转矩称为额定转矩 T_N 。当电动机工作在额定转矩 T_N 时, s_N 通常在 $0.02 \sim 0.06$ 之间, 转速在很小的范围内变化时, 转矩即可在很大的范围内变化, 即工作于额定转矩 T_N 时, 电动机具有很硬的机械特性。

3. 最大转矩 T_M

在 $n=n_L$ ($s=s_L$), $T=T_M$ 点, 这点的转矩称为最大转矩 T_M 。 T_M 的大小象征着电动机的过载能力, 用过载倍数 λ 表示, $\lambda = T_M/T_N$ 。在任何情况下, 电动机的负载转矩都不能大于 T_M , 否则电动机转速将急剧下降, 致使电动机堵转停止, 因此, 这一点称为临界转速点。临界转速 n_L 的大小决定了 L 点的上下位置, 从而反映了机械特性的硬度。

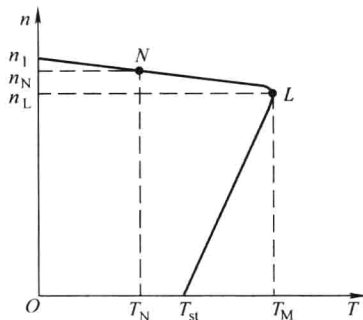


图 1-5 三相异步电动机的机械特性曲线

1.2.3 三相异步电动机的变频起动

在拖动系统中, 电动机要经常起动和停止(即制动)。从提高劳动生产率的角度看, 电动机起动时间、制动时间越短越好, 但是由于三相异步电动机的具体特点, 起动时间、制动时间又不能太短。

人们希望电动机起动时, 起动电流不要太大, 而起动转矩要足够大, 但是实际情况恰恰相反。在起动瞬间, 转子还没转动, $s=1$, 由于转子以较大的转速切割旋转磁场, 在转子绕组中产生较大的感应电动势 E_2 和电流 I_2 , 根据磁动势平衡关系, 定子电流随着转子电流改变而改变, 所以起动时定子电流 I_{st} 也很大, 一般会达到额定电流 I_N 的 $4 \sim 7$ 倍, 这样大的起动电流会在电路中产生过大的电压降, 从而影响接在同一电网上的其他用电设备的正常运行。

在生产中, 除了小容量的三相异步电动机能直接起动外, 一般要采取不同的方法起动, 比如自耦变压器减压起动、串电阻或电抗器减压起动、 $Y-\Delta$ 减压起动等。在变频调速拖动系统中, 变频器用降低频率 f_1 从而也降低了 U_1 的方法来起动电动机。图 1-6 所示为低频起动时电动机的机械特性曲线。电动机以很低的频率起动, 随着频率的上升, 转速上升, 直至达到电动机的工作频率后, 电动机稳速运行。在此过程中, 转速差 Δn 被限制在一定的范围内, 起动电流也将被限制在一定的范围内, 而且动态转矩 ΔT 很小, 起动过程很平稳。

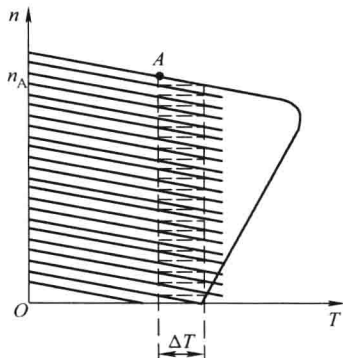


图 1-6 低频起动时电动机的机械特性曲线

1.2.4 三相异步电动机的变频制动

电动机的制动状态是指电磁转矩 T 与转速 n 方向相反的状态。三相异步电动机的制动方

式有直流制动、回馈制动和反接制动等。由于反接制动在变频调速系统中禁止使用，所以下面只介绍前两种制动方式。

1. 直流制动

电动机制动时，切断电动机的三相电源，在定子绕组中通入直流电，产生一恒定磁场，如图 1-7a 所示。由于转子在机械惯性作用下仍按原方向旋转，它切割恒定磁场产生感应电流，用左手定则可判断感应电流在磁场中的受力方向，从而可判断电磁转矩方向与转子转速方向相反，即为制动转矩。如图 1-7b 所示，曲线①为原电动运行状态机械特性曲线，曲线②为直流制动运行状态机械特性曲线。直流制动过程是由电动运行状态的 A 点平跳至曲线②的 B 点，在制动转矩和负载转矩共同作用下沿着曲线②减速，直到 $n=0$ ，直流制动结束。直流制动的实质是将转子中储存的机械能转换成电能，并消耗在转子电阻上。

2. 回馈制动

由于某些原因，当 $n > n_1$ 时，转子切割旋转磁场的方向和电动运行状态 $n < n_1$ 正好相反，转子中感应电动势和电流的方向也相反，电磁转矩 T 也就和 n 反向，为制动转矩。回馈制动的实质是将轴上的机械能转换成电能，回馈给电源。

如图 1-8 所示，曲线①第一象限为电动机电动运行状态的机械特性曲线。下面分析两种不同的回馈制动情况。

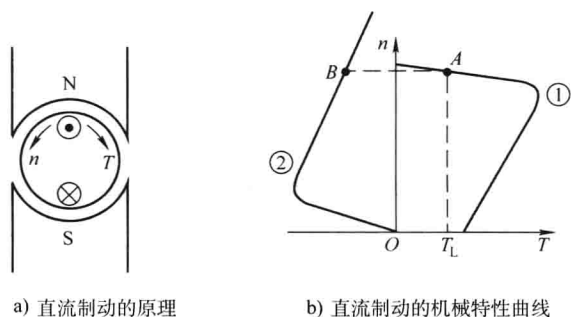


图 1-7 直流制动的原理与机械特性

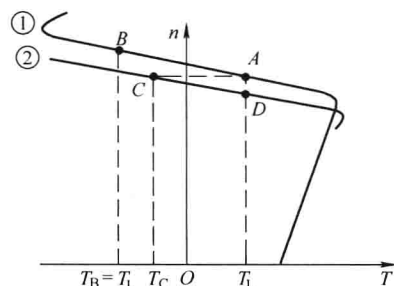


图 1-8 回馈制动的机械特性曲线

1) 起重机下放重物时，电动机处于回馈制动状态，曲线①第二象限为其机械特性曲线，制动的过程如下：由于重力作用，电动机转速 n 沿曲线①增加，当 $n > n_1$ 时，电磁转矩 T 为制动转矩，直到 $T = T_B = T_L$ ，工作点由 A 点移至 B 点，重物以 n_B 匀速下放。

2) 变频调速时，由于 f_1 降低使电动机处于回馈制动状态，曲线②第二象限为其机械特性曲线，制动的过程如下： f_1 降低瞬间，由于机械惯性，电动机转速 n 来不及变化，工作点由 A 点平跳至 C 点，于是得到制动转矩 T_C ，使电动机沿着曲线②减速。

1.3 变频器的结构与主要技术参数

1.3.1 变频器的外形

变频器的外形大致可分为挂式、柜式和柜挂式三种，功率小的一般采用挂式，功率大的一般采用柜式，柜挂式是变频器制造企业为方便用户安装推出的一种外形。图 1-9 所示为森