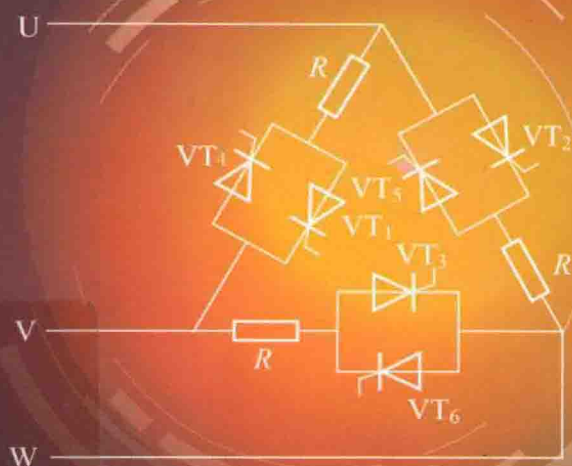


高职高专自动化类“十二五”规划教材

变频调速技术 及应用

王瑾 孙艳萍 主编



化学工业出版社

高职高专自动化类“十二五”规划教材

变频调速技术及应用

王 瑾 孙艳萍 主 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本教材从变频器的结构入手,首先介绍组成变频器的电力电子器件的结构、工作原理以及各种应用。对没有学过电知识的人,也能从元器件开始,深入浅出学习变频器的工作原理。在此基础上,以电动机为被控对象,介绍变频调速原理及变频调速工作方式。以西门子 MM430 系列变频器为例,介绍了变频器的选择、安装、接线、参数调整、抗干扰措施和运行检修。本教材拓展介绍了多套工业设备或系统,使得变频器的参数设置和调试更注重培养学生的工程应用能力和解决现场实际问题的能力。将变流技术与交流调速有机结合起来。用较少的课时完成两门课程的学习。同时,本教材精选了四个实训环节,力求在最简单的实训硬件配置情况下,完成实用性较强、较先进的变频器应用,如 PID 控制、触摸屏控制系统等。

本书适合于高职院校电气自动化专业和机电设备维修与管理专业的学生,也适用于生产过程自动化专业、机电一体化专业和自动控制技术专业的学生。也可作为企业相关技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

变频调速技术及应用/王瑾,孙艳萍主编. —北京:化学工业出版社,2012.1

高职高专自动化类“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-13085-3

I. 变… II. ①王…②孙… III. 变频调速-高等职业教育-教材 IV. TM921.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 271924 号

责任编辑:张建茹 刘 哲

文字编辑:吴开亮

责任校对:战河红

装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 10½ 字数 254 千字 2012 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:22.00 元

版权所有 违者必究

前 言

高职高专教材建设是高职院校教学改革的重要组成部分,2009年全国化工高职仪电类专业委员会组织会员学校对近百家自动化类企业进行了为期一年的广泛调研。2010年5月在杭州召开了全国化工高职自动化类规划教材研讨会。参会的高职院校一线教师和企业技术专家紧密围绕生产过程自动化技术、机电一体化技术、应用电子技术及电气自动化技术等自动化类专业人才培养方案展开研讨,并计划通过三年时间完成自动化类专业特色教材的编写工作。主编采用竞聘方式,由教育专家和行业专家组成的教材评审委员会于2011年1月在广西南宁确定出教材的主编及参编,众多企业技术人员参加了教材的编审工作。

本套教材以《国家中长期教育改革和发展规划纲要》及2006年教育部《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》为编写依据。确定以“培养技能,重在应用”的编写原则,以实际项目为引领,突出教材的应用性、针对性和专业性,力求内容新颖,紧跟国内外工业自动化技术的最新发展,紧密跟踪国内外高职院校相关专业的教学改革。

本书以变频调速技术及其应用为核心,首先安排了与变频器相关的电力电子器件基础知识的讲授,以及一些电力电子器件的实际应用与开发,对于没有学过电力电子技术课程的学生,也能较好理解和掌握变频器的结构和工作原理。

本书以西门子MM430系列变频器为例,深入浅出地介绍了变频器的选择、安装、接线、参数调整、抗干扰措施和运行检修,使学生不但了解了变频器的相关知识,同时加强了应用变频技术的能力。由于变频器的应用领域十分广泛,它所带的负荷特性千差万别,其应用也必然涉及各种各样现场设备。为此,本书拓展介绍了多套工业设备和系统,使得变频器的参数设置和调试更注重培养学生的工程应用能力和解决现场实际问题的能力。同时,本书精选了四个实训环节,力求在最简单的实训硬件配置情况下,完成实用性较强、较先进的变频器应用,如PID控制、触摸屏控制系统等。

本书由王瑾、孙艳萍任主编。全书由7章组成,第1章、第2章2.1~2.3节、第5章由王瑾编写;第2章2.4节、2.5节由马少丽编写;第3章由孙艳萍编写;第4章由吕志香编写;第6章、第7章由李长速编写。全书由王瑾统稿。特别感谢马应魁教授和童克波副教授在本书编写过程中给予的帮助。本书在编写过程中参阅了部分兄弟院校的教材及国内外文献资料,在此对原作者表示深深的敬意和衷心的感谢。

由于编者水平有限和编写时间比较仓促,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

全国化工高职仪电专业委员会
2011年7月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 变频系统技术	1
1.2 变频调速技术的发展过程	2
1.3 中国变频调速技术的发展状况	3
1.4 变频技术的发展方向	4
1.5 高压变频调速技术应用现状与发展趋势	6
思考题与习题	7
第 2 章 电力电子器件	8
2.1 电力电子器件概述	8
2.2 不可控器件——二极管及其应用	10
2.3 半控型器件——晶闸管及其应用	11
2.4 全控型器件	16
2.5 新型电力电子器件	27
思考题与习题	29
第 3 章 电力电子器件的应用与开发	31
3.1 小功率电力电子器件的应用	31
3.2 电力电子器件的综合应用	35
3.3 新型电力电子器件的开发	40
思考题与习题	45
第 4 章 变频调速原理	46
4.1 变频调速的基本原理	46
4.2 变频器的分类	49
4.3 交-直-交变频器主电路及其变频调速系统	51
4.4 正弦脉宽调制变频器及其调速系统	57
4.5 西门子变频器简介	61
4.6 通用变频器的控制电路原理	64
4.7 高压变频器主电路结构及其控制特点	66
思考题与习题	69
第 5 章 变频器的选用	70
5.1 变频器的选择	70
5.2 变频器的安装	76
5.3 变频器的接线	78
5.4 变频器的功能及参数	81

5.5 变频器的抗干扰技术	98
思考题与习题	104
第6章 变频技术的综合应用	105
6.1 变频技术在空调设备上的应用	105
6.2 变频技术在机床设备上的应用	110
6.3 变频技术在电梯设备上的应用	117
6.4 变频技术在电线生产线上的应用	120
6.5 变频技术在风机上的应用	122
6.6 变频技术在起重机上的应用	126
6.7 变频技术在恒压供水上的应用	129
思考题与习题	136
第7章 变频技术实训	137
7.1 基础实训 西门子 MM440 变频器的参数设置及调试	137
7.2 基础实训 西门子 MM440 变频器的操作与控制	139
7.3 综合实训 变频实现水箱水位控制的实训	147
7.4 综合实训 PLC、变频器和触摸屏综合实训	153
思考题与习题	158
参考文献	159

第 1 章 概 述

1.1 变频系统技术

电能的 85% 以上都用于电动机。由于相同容量的交流电动机比直流电动机结构简单, 体积小、重量轻、维护方便, 因此工业用电的 60% 以上电能都消耗在交流异步电动机上, 而采用变频器作为交流异步电动机的传动控制器已成为交流调速的绝对主流。

电力拖动自动控制系统, 又称电气传动控制系统, 通常由电动机、电源控制装置和检测反馈装置三部分组成。电气传动关系到合理地使用电动机, 应达到节约电能和控制机械的运转状态 (位置、速度、加速度等), 实现电能-机械能的转换的目的, 取得优质、高产、低耗的效果。电气传动根据转速是否需要调节, 分为不调速和调速两大类。不调速电动机直接由电网供电, 但随着电力电子技术的发展, 这类原本不必调速的机械越来越多地改用调速传动以节约电能 (节约 15%~20% 或更多), 以改善产品质量, 提高产量。调速系统又分为直流调速系统和交流调速系统两种方式。直流调速系统的被调节对象是直流电动机, 交流调速系统的被调节对象是交流电动机。

由于交流电动机比同容量直流电动机结构简单、容易维护、体积小、重量轻、制造成本低, 因此, 近年来交流调速中最活跃、发展最快的就是变频调速技术。交流变频调速传动克服了直流电动机的缺点, 发挥了交流电动机本身固有的优点 (结构简单、坚固耐用、经济可靠、动态响应好等), 并且很好地解决了交流电动机调速性能先天不足的问题 (图 1-1)。交流变频调速技术以其卓越的调速性能、显著的节电效果以及在国民经济各领域的广泛适用性, 而被公认为是一种最有前途的交流调速方式, 代表了电气传动发展的主流方向。变频调速技术为节能降耗、改善控制性能、提高产品的产量和质量提供了至关重要的手段。变频调速理论已形成较为完整的科学体系, 成为一门相对独立的学科。



图 1-1 变频调速过程

变频调速是交流调速的基础和主干, 它属于转差功率不变的调速, 是节能型调速技术。变压器可以方便地改变交流电压, 但长期以来, 交流电的频率一直是固定的, 而变频技术的出现使频率变为可以充分利用的资源。

利用变频器中电力电子器件的通断控制将固定频率、固定电压的交流电变换为频率、电压都可连续调节的交流电的技术, 称为变频调速技术。变频调速技术的基本原理是根据电动机转速与工作电源输入频率成正比的关系: $n=60f(1-s)/p$ (式中, n 、 f 、 s 、 p 分别表示转速、输入频率、电动机转差率、电动机磁极对数)。通过改变电动机工作电源频率可以实现改变电动机转速的目的。变频器就是基于上述原理采用交-直-交电源变换技术、电力电子、微电脑控制等技术于一身的综合性电气产品。

变频调速技术涉及电力、电子、电工、信息与控制等多个学科领域。随着电力电子技术、计算机技术和自动控制技术的发展,以变频调速为代表的近代交流调速技术有了飞速的发展。

1.2 变频调速技术的发展过程

变频调速被认为是一种理想的交流调速方法,而如何得到一个单独的给异步电动机供电的、经济可靠的变频电源,一直是交流调速的主要课题。20 世纪是电力电子变频技术由诞生到发展的一个全盛时代。最初的交流变频调速理论诞生于 20 世纪 20 年代,20 世纪 50 年代末晶闸管在美国问世,标志着电力电子技术就此诞生。第一代电力电子器件主要是半控型硅晶体闸流管(可控硅 SCR),随着普通晶闸管、小功率管的实用化,出现了静止变频装置,它是将三相工频交流电源经变换后,得到频率可调的交流电,这个时期的变频装置大多由分立元件组成,它体积大、造价高、控制复杂,大多是为特定的控制对象研制的,容量普遍偏小,控制方式很不完善,调速后,电动机的静态、动态性能不是很理想,特别是低速运行时性能较差,限制了系统的调速范围,因此,仅用于纺织、磨床等特定场合。直到 20 世纪 60 年代,由于电力电子器件的发展,才促进了变频调速技术向实用方向发展。20 世纪 70 年代席卷工业发达国家的石油危机,促使发达国家投入大量的人力、物力、财力去研究高效率的变频器。电力电子技术和微电子技术发展速度十分迅速,人们陆续发明的功率晶体管(GTR)、门极可关断晶闸管(GTO)、功率 MOS 场效应管(功率 MOSFET)、绝缘栅晶体管(IGBT)、静电感应晶体管(SIT)和静电感应晶闸管(SITH)等,它们的共同特点是既能控制其导通,又能控制其关断,是全控型开关器件。由于不需要换流电路,故较之 SCR,变频器体积小、重量轻。当前,IGBT 以其优异的特性已成为主流器件,容量大的 GTO 也有一定地位,使变频调速技术有了很大发展并得到推广应用。20 世纪 80 年代,变频调速已产品化,性能也不断提高,发挥了交流调速的优越性,广泛地应用于工业各部门,并且部分取代了直流调速。

进入 20 世纪 90 年代,由于新型电力电子器件如 IGBT(绝缘栅双极型晶体管 Insolated Gate Bipolar Transistor)、IGCT(集成门极换流型晶闸管 Integrated Gate Commutated Thyristor)等的发展及性能的提高、计算机技术的发展,如由 16 位机发展到 32 位机以及 DSP(数字信号处理器 Digital Signal Processor)的诞生和发展(如磁场定向矢量控制、直接转矩控制)等原因,极大地提高了变频调速的技术性能,促进了变频调速技术的发展,使变频器在调速范围、驱动能力、调速精度、动态响应、输出性能、功率因数、运行效率及使用的方便性等方面大大超过了其他常规交流调速方式,其性能指标亦超过了直流调速系统,达到取代直流调速系统的地位。目前,交流变频调速以其优异的性能而深受各行业的普遍欢迎,在电力、轧钢、造纸、化工、水泥、煤炭、纺织、铁路、食品、船舶、机床等传统工业的改造中和航天航空等高新技术的发展应用中,都看到变频调速技术的踪影,变频调速技术取得了显著的经济效益。

许多国家都在努力开发大容量器件,国外已生产出额定电压达 6000V 的 IGBT。而 IEGT(Injection Enhanced Gate Thyristor)是一种将 IGBT 和 GTO 的优点结合起来的新型器件,已有 1000A/4500V 的样品问世。IGCT(Integrated Gate Commutated Thyristor)在 GTO 基础上采用缓冲层和透明发射极,它开通时相当于晶闸管,关断时相当于晶体管,从

而有效地协调了通态电压和阻断电压的矛盾,工作频率可达几千赫兹。瑞士 ABB 公司已经推出的 IGCT 额定电压可达 4500~6000V,额定电流达 3000~3500A。MCT 因进展不大从而不被采用。IGCT 的发展使其在电力电子器件的新格局中占有重要的地位。与发达国家相比,中国在器件制造领域比在应用领域有更大的差距。高功率沟栅结构 IGBT 模块、IEGT、MOS 门控晶闸管、高压硅化镓高频整流二极管、碳化硅(SiC)等新型功率器件在国外有了最新发展。可以相信,采用 GaAs、SiC 等新型半导体材料制成功率器件,实现了人们对“理想器件”的追求,将是 21 世纪电力电子器件发展的主要趋势。

高可靠性的电力电子积木(PEBB)和集成电力电子模块(IPEM),是近期美国电力电子技术发展新热点。GTO 和 IGCT、IGCT 和高压 IGBT 等电力电子新器件之间的激烈竞争,必将为 21 世纪世界电力电子新技术和变频技术的发展带来更多的机遇和挑战。

随着电力电子器件的飞速发展,变频调速技术也随之取得了日新月异的进步,开始出现了通用变频器,它功能丰富,可适用于不同的负载和场合。

1.3 中国变频调速技术的发展状况

1.3.1 变频调速技术的现状具有的特点

① 在功率器件方面,近年来,高电压、大电流的 SCR、GTO、IGBT、IGCT 等器件的生产以及并联、串联技术的应用,使高电压、大功率变频器产品的生产及应用成为现实。

② 在微电子技术方面,16 位、32 位高速微处理器以及 DSP 和 ASIC(专用集成电路 Application Specific IC)技术的快速发展,为实现变频器高精度、多功能化提供了硬件手段。

③ 在控制理论方面,矢量控制、磁通控制、转矩控制、智能控制等新的控制理论为研制高性能变频器的发展提供了相关理论基础。

④ 在产品化生产方面,基础工业和各种制造业的高速发展,促进了变频器相关配套件的社会化、专业化生产。

中国是一个发展中国家,变频调速产品大体只相当于国际上 20 世纪 80 年代水平。随着改革开放的进一步推进,中国形成了一个巨大的市场,它既对国内企业,也对外国公司敞开。很多先进的产品从发达国家进口,在中国运行良好,满足了中国生产和生活需要。国内许多合资公司生产当今国际上先进的产品,国内的成套部分在自行设计制造的成套装置中采用进口国外公司和合资企业的先进设备,自己开发应用软件,能为国内外重大工程项目提供一流的电气传动控制系统,虽然已经取得很大成绩,但应看到由于国内自行开发、生产产品的能力弱,对外国公司的依赖性严重。

1.3.2 我国变频调速技术的发展状况

(1) 晶闸管变流器和开关器件(DJT、IGBT、VDMOS)、斩波器供电的直流调速设备

随着交流调速的发展,该市场虽在缩减,但中国旧设备改造任务多,以及价格比交流调速低得多,所以在短期内市场不会缩减很多。国产设备能满足需要,部分出口。自行开发的控制器多为模拟控制,近年来主要采用进口数字控制器配国产功率装置。

(2) IGBT 或 BJT PWM 逆变器供电的交流变频调速设备

这类设备的市场很大,总容量占的比例不大,但台数多,增长快,应用范围从单机扩展到全生产线,从简单的 U/f 控制到高性能的矢量控制。约有 50 家工厂和公司生产,其中合

资企业占很大比重。

(3) 负载换流式电流型晶闸管逆变器供电的交流变频调速设备

这类产品在抽水蓄水电站的机组启动,大容量风机、泵、压缩机和轧机传动方面有很大需求。国内只有少数科研单位有能力制造,目前容量最大做到 12MW。功率装置国内配套,自行开发的控制装置只有模拟式的,数字装置需进口,由自己开发应用软件。

(4) 交-交变频器供电的交流变频调速设备

这类产品在轧机和矿井卷扬传动方面有很大需求,台数不多,功率大。主要靠进口,国内只有少数科研单位有能力制造。目前最大容量 7000~8000kW。功率装置部分国产,数字控制装置进口,包括开发应用软件。

近年来,国内具有一定规模和实力的变频器厂家开始在产品关键技术研制方面加大投入,进行自主研发和创新,并按照国际标准进行生产,使国产变频器的整体技术水平得到大幅提高。如某公司率先自行研发高性能矢量控制变频器,采用了“拟超导矢量控制变频技术”等多项专利、专有技术,产品多项指标已达到国际先进水平,获得了市场的好评。同时,国内变频器厂家对市场进行了细分,针对中国市场的实际需求,实现了与国外产品的差异化生产,在专用变频器的开发和应用推广上取得了一定的成绩,并被市场所接受。

1.4 变频技术的发展方向

1.4.1 打破垄断格局

随着中国低压变频器行业 20 多年的高速发展,该行业已逐步打破外商垄断的格局。

大功率交-交变频(循环变流器)调速技术在过去 20 年的发展中,低压变频器生产企业“群雄并起”,不但有日本三垦公司、富士公司,德国西门子公司,瑞士 ABB 公司等外资企业进入中国市场并建厂,还有成都森兰公司、深圳英威腾公司、台州富凌公司等 70 多家国产变频器厂家进入市场。目前中国低压变频器市场年销售额在 10 亿元以上。从 2005 年至今,中国低压变频器市场平均年销售额增长在 20% 以上。

从市场份额看,国内品牌的市场份额已从 2002 年的 8% 迅速扩大到 2009 年的 40%,但仍有 60% 的外资品牌。从市场的品牌数量看,国内品牌数量最多,约占 70%。国内变频器制造企业的品牌效应正在逐渐形成,但整体实力尚不足以和国际顶级品牌相抗衡,差距是明显存在的,但正在逐渐缩小。

1.4.2 未来潜力巨大

根据中国目前电动机装机总量、电动机配装变频器比例、国家对“节能降耗”的规划目标,以及中国经济发展速度等因素考虑,中国变频器市场的潜力还很大。近十多年来,随着电力电子技术、计算机技术、自动控制技术的飞速发展,电气传动技术经历着一场历史革命,即交流调速取代直流调速、计算机数字控制技术取代模拟控制技术已成为必然趋势。交流变频调速技术是当今电气领域节约电能、改善工艺流程、提高产品质量、优化生态环境、推动技术进步的重要手段。变频调速以其优质的调速性能和良好的启制动性能,以及其高效率、高功率因数、宽广的使用范围的特点,被国内外公认为是最有前途的调速方法在系统中引入触摸屏、PLC 等技术,使调速系统的设计更加完善、更加直观、更加方便。

截至 2006 年底,中国发电机装机总容量已突破 5 亿千瓦。其中火电装机约占 80%,为 4 亿千瓦左右。全国年发电量已突破 2 万亿千瓦时。而我国的能源利用率却比发达国家平均

低 20% 左右。

全国电动机装机总容量已达 4 亿多千瓦, 年耗电量达 12000 亿千瓦时, 占全国总用电量的 60%, 占工业用电量的 80%。其中, 风机、水泵、压缩机的装机总容量已超过 2 亿千瓦, 年耗电量达 8000 亿千瓦时, 占全国总用电量的 40% 左右。70% 以上的风机、水泵、压缩机应调速运行, 而至今仅有约 5% 调速运行。

若按风机、水泵和压缩机总装机容量的 50% 进行调速节能改造, 则可改造容量达 1 亿千瓦, 其中 40% 为中高压电动机, 容量占 60%。若按电动机平均出力为 60%, 年运行 4000 小时, 平均节电率为 20%~30% (平均 25%) 计算, 则年节电潜力为 600 亿千瓦时。整个电动机系统的节电潜力约为 1000 亿千瓦时。

根据国家节能计划, 中国每年应节约和少用能源 7000 万吨标准煤, 通过基本建设项目及技术改造措施, 每年可形成约 3000 万吨标准煤的节能能力, 而每形成一吨标准煤的节能能力需投资 2000 元 (约为开发等量能源费用的三分之一), 则每年需节能投资 600 亿元。

由于中国经济的高速发展, 发电机装机仍以高速发展, 但电力运行的一些主要指标和装备指标与发达国家相比仍有很大差距: 中国火电机组的平均煤耗为 $400\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 比发达国家高出约 $70\sim 100\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$; 发达国家发电厂的厂用电率为 $3.7\%\sim 6\%$, 而中国的厂用电率为 $4.7\%\sim 10.5\%$, 加之线损, 中国送到用户的电能要比发达国家多耗电 9.5% , 相当于 22000MW 装机容量, 即 22 个百万大厂的年发电量。因此, 我国的节能形势十分严峻!

1.4.3 研发重点领域

该行业未来重点研发产品的领域有五个方面。

(1) 高性能变频调速设备

随着电力电子和交流电动机控制技术的发展, 大型工业系统中轧钢、提升机、造纸机等传统由直流电动机调速的场合, 近年来均用变频调速取代, 这不仅提高性能, 减少维护, 并可节能 20%~30%。

(2) 牵引用变频调速设备

牵引用变频调速设备用于电力机车、轻轨等电驱动运输机械。这类驱动过去也多采用直流调速, 现在正逐步改为变频调速。由于工作环境恶劣, 对产品耐电压波动、结构、冷却等方面都有特殊要求, 牵引调速用的多为专用变频调速设备。

(3) 特殊调速用变频调速设备

应用于极高速度、极宽调速范围的变频调速设备的某些应用场合, 电动机和变频调速设备都需要特制。

(4) 绿色发电用变频调速设备

绿色发电即利用风力、水力及太阳能发电, 在环境问题日益突出的今天, 这类发电受到越来越多的关注, 其发展非常迅速。

(5) 清洁电能变流器

清洁电能变流器是指变流器的功率因数为 1, 网侧和负载侧有尽可能低的谐波分量, 以减少对电网的公害和电动机的转矩脉动。对于中小容量变流器, 提高开关频率的 PWM 控制是有效的。对于大容量变流器, 在常规的开关频率下, 可改变电路结构和控制方式, 实现清洁电能的变换。

1.5 高压变频调速技术应用现状与发展趋势

1.5.1 高压变频的发展

中国高压变频器市场“十一五”期间保持着爆发性增长的态势，该行业经过起步阶段，目前正逐步趋于成熟。

通常，我们把用来驱动 1kV 以上交流电动机的中、大容量变频器称为高压变频器。按照国际惯例和中国国家标准，当供电电压大于或等于 10kV 时称高压，小于 10kV 时称中压。因此，相应额定电压 1~10kV 的变频器应分别称为中压变频器和高压变频器。这一电压范围内的变频器有着共同的特征，且通常习惯上也把额定电压为 3kV 或 6kV 的电动机称为“高压电动机”，因此，对应电压范围的变频器也称之为“高压变频器”。

变频器技术存在一个从低压向高压、从小功率向大功率转变的技术发展过程，体现在产品发展趋势上就是变频器产品的功率越来越大，适用于更大规模电动机的节能调速需求。大功率变频器制造技术早先基本掌握在国外厂商手中，随着国内企业技术水平提高，国产变频器产品的功率也随之逐步提高，因此国内品牌对国外品牌实现替代的过程是一个先替代小功率变频器产品，后替代大功率变频器产品的过程，使得变频器市场上的大功率产品逐渐增多，市场向大功率产品发展的趋势明显。

高端高压变频技术的成熟，将不断刺激工艺控制对于变频调速的需求。随着高压变频技术中矢量控制和能量回馈等高级功能的开发和成熟运用，高压变频器正被快速应用于轧钢机、矿井提升机、电气机车牵引系统等，进一步拓展了高压变频调速技术的适用方向和市场领域。

1.5.2 高压变频器的特点

目前世界上的高压变频器不像低压变频器那样具有成熟的，一致性的主电路拓扑结构，而是限制于功率器件的电压耐受量和高压使用条件的矛盾。国内外各变频器生产厂家采用不同的功率器件和不同的主电路拓扑结构，以适应不同的电压等级和各种拖动设备的要求，因而在各项性能指标和适用范围上也各有差异。

一般来讲，在高压供电而功率器件耐压能力有限的情况下，可采用将功率器件串联的方法来解决。但是功率器件在串联使用时，因为各器件的动态电阻和极间电容不同，而存在静态均压和动态均压问题。如果采用与器件并联电阻和电容的均压措施，会使电路复杂，损耗增加；同时，器件的串联对驱动电路的要求也大大提高，要尽量做到串联器件同时导通和关断，否则由于各器件开断时间不一致，承受电压不均，会导致器件损坏甚至整个装置崩溃。

谐波问题是所有变频器的共同问题，尤其在高压大功率变频调速中更为突出。谐波会污染电网，殃及同一电网上的其他用电设备，甚至影响电力系统的正常运行；谐波也会干扰通信和控制系统，严重时会使通信中断、系统瘫痪；谐波电流还会使电动机损耗增加，因而发热增加，效率及功率因数下降，以至不得不“降额”使用。

还有效率问题。变频调速装置的容量愈大，调速系统的效率问题也就愈加重要。采用不同的主电路拓扑结构，使用的功率器件的种类和数量的多少，以及变压器、滤波器等的使用，都会影响系统的效率。为了提高系统效率，必须设法尽量减少功率开关器件和变频调速装置的损耗。

可靠性和冗余设计问题：一般的高压大功率拖动系统都要求很高的系统可靠性，尤其是

国民经济的重要部门，如电力、能源、冶金、矿山和石化等行业，一旦设备出现故障，将会造成人民生命财产的巨大损失，因此高压变频装置设计中是否便于采用冗余设计及旁路控制功能也是至关重要的。

根据高压变频器有无直流环节，可以分为交-交变频器和交-直-交变频器；根据直流环节滤波元件的性质又可以分为电流源型变频器和电压源型变频器。电流源型变频器又可以分为负载换流式晶闸管变频器（LCI）和采用自关断器件的电流源型变频器；电压源型变频器则可以分为：功率器件串联两电平直接高压变频器；采用 HV-IGBT、IGCT 的多电平电压源变频器；采用 LV-IGBT 的单元串联多重化电压源变频器等。

由于本地化生产、规模效应的存在和技术的日益成熟，整个行业的产品制造成本相比以前大幅下降。产品价格的降低，使得高压变频器的性价比明显上升，“价格”不再让用户感到望而生畏。终端用户购买高压变频器后，节能效果非常显著，市场需求会不断增加。

思考题与习题

- 1-1 什么是变频调速技术，现代变频调速技术主要应用在哪些场合？
- 1-2 变频调速技术的发展趋势是什么？
- 1-3 高压变频调速技术应用现状与发展趋势。

第2章 电力电子器件

2.1 电力电子器件概述

变频器电源主要用于交流电动机的变频调速，其在电气传动系统中占据的地位日趋重要，已获得巨大的节能效果。变频器电源主电路均采用交-直-交方案。工频电源通过整流器变成固定的直流电压，然后由大功率晶体管或 IGBT 组成的 PWM 高频变换器，将直流电压逆转换成电压、频率可变的交流输出，电源输出波形近似于正弦波，用于驱动交流异步电动机实现无级调速。这些变换都离不开电力电子器件。

优化控制策略，精选功能组件，是变频电源研制的发展方向。

电力电子器件 (Power Electronic Device) 又称为功率半导体器件 (图 2-1)，用于电能变换和电能控制电路中的大功率 (通常指电流为数十至数千安，电压为数百伏以上) 电子器件。

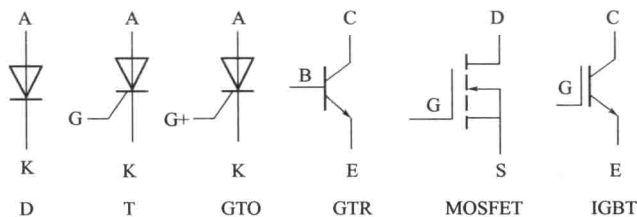


图 2-1 常用电力电子器件的符号

本章主要介绍在变频调速技术中常用的各种电力电子器件，包括不可控器件功率二极管、半控型器件晶闸管以及全控型器件功率晶体管 (GTR)、功率场效应晶体管 (P-MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)、智能功率模块 (IPM) 及一些新型电力电子器件。

2.1.1 电力电子器件的概念和特征

电力电子器件可直接用于处理电能的主电路中，是实现电能的变换或控制的电子器件。

电力电子器件的一般特征如下。

① 能处理电功率的大小，即承受电压和电流的能力，是最重要的参数。其处理电功率的能力小至毫瓦级，大至兆瓦级，大多都远大于处理信息的电子器件。

② 电力电子器件一般都工作在开关状态。

- 导通时 (通态) 阻抗很小，接近于短路，管压降接近于零，而电流由外电路决定。
- 阻断时 (断态) 阻抗很大，接近于断路，电流几乎为零，而管子两端电压由外电路决定。

● 电力电子器件的动态特性（也就是开关特性）和参数，也是电力电子器件特性很重要的方面，有些时候甚至上升为第一位的重要问题。

● 作电路分析时，为简单起见往往用理想开关来代替。

③ 实用中，电力电子器件往往需要由信息电子电路来控制。在主电路和控制电路之间，需要一定的中间电路对控制电路的信号进行放大，这就是电力电子器件的驱动电路。

④ 为保证不致因损耗散发的热量导致器件温度过高而损坏，不仅在器件封装上讲究散热设计，在其工作时一般都要安装散热器。

● 导通时，器件上有一定的通态压降，形成通态损耗。

● 阻断时，器件上有微小的断态漏电流流过，形成断态损耗。

● 在器件开通或关断的转换过程中产生开通损耗和关断损耗，总称开关损耗。

● 对某些器件来讲，驱动电路向其注入的功率也是造成器件发热的原因之一。

● 通常电力电子器件的断态漏电流极小，因而通态损耗是器件功率损耗的主要原因。

● 器件开关频率较高时，开关损耗会随之增大而可能成为器件功率损耗的主要因素。

2.1.2 应用电力电子器件的系统组成

① 电力电子系统：由控制电路、驱动电路和以电力电子器件为核心的主电路组成（图2-2）。控制电路按系统的工作要求形成控制信号，通过驱动电路去控制主电路中电力电子器件的通或断来完成整个系统的功能。

② 控制电路按系统的工作要求形成控制信号，通过驱动电路去控制主电路中电力电子器件的通或断来完成整个系统的功能。

③ 有的电力电子系统中，还需要有检测电路。广义上往往其和驱动电路等主电路之外的电路都归为控制电路，从而粗略地说电力电子系统是由主电路和控制电路组成的。

④ 主电路中的电压和电流一般都较大，而控制电路的元器件只能承受较小的电压和电流，因此主电路和控制电路连接的路径上，如驱动电路与主电路的连接处，或者驱动电路与控制信号的连接处，以及主电路与检测电路的连接处，一般需要进行电气隔离，通过其他手段如光、磁等来传递信号。

⑤ 由于主电路中往往有电压和电流的过冲，而电力电子器件一般比主电路中普通的元器件要昂贵，但承受过电压和过电流的能力却要差一些，因此，在主电路和控制电路中附加一些保护电路，以保证电力电子器件和整个电力电子系统正常可靠运行，也往往是非常必要的。

⑥ 器件一般有三个端子（或称极或管角），其中两个连接在主电路中，而第三端被称为控制端（或控制极）。器件通断是通过在其控制端和一个主电路端子之间加一定的信号来控制的，这个主电路端子是驱动电路和主电路的公共端，一般是主电路电流流出器件的端子。

按照器件能够被控制电路信号所控制的程度，电力电子器件分为以下三类：不可控器件——不能用控制信号来控制其通断，因此也就不需要驱动电路；半控型器件——通过控制信号可以控制其导通而不能控制其关断；全控型器件——通过控制信号既可控制其导通又可控制其关断，又称自关断器件。

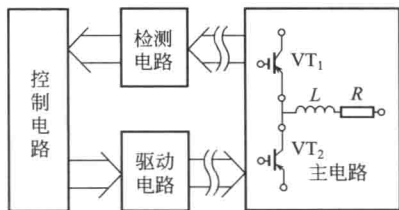


图 2-2 电力电子器件在实际应用中的系统组成

2.2 不可控器件——二极管及其应用

2.2.1 功率二极管的基本特性

功率二极管又称为电力二极管，承受高电压大电流的能力较强，且具有较大的耗散功率，由一个面积较大的 PN 结和两端引线封装而成，引出的两端电极分别为阳极 A 和阴极 K。功率二极管与电子技术中常用的中小功率二极管的结构、工作原理以及伏安特性相似。图 2-3 所示为功率二极管的结构图与符号图。当二极管在施加正向阳极电压时，元件两端正偏电压很小（1V 左右）时，PN 结导通，元件正向压降（正向平均电压 U_F 在 0.45~1V 之间）；反之，若二极管在施加反向阳极电压（小于击穿电压）时，PN 结反偏，二极管截止，只有很小的可忽略的反向漏电流流过。由于二极管的导通速度和反向恢复时间相对于电力电路变化过程迅速得多，因此，可以把二极管当作理想的开关元件。

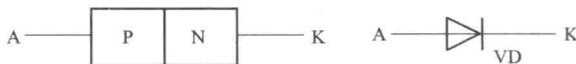


图 2-3 功率二极管的结构图与符号图

功率二极管主要参数的选择原则与普通二极管有所不同。在规定的环境温度和标准散热

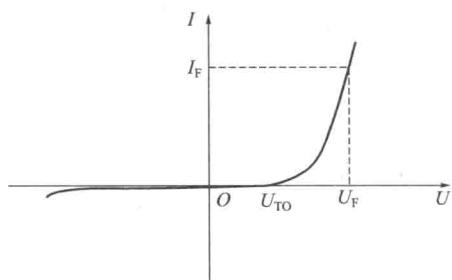


图 2-4 功率二极管的伏安特性

条件下，元件允许长时间连续流过单相工频正弦半波的电流平均值，称为额定通态平均电流 I_F ，简称额定电流。其有效值应大于元件在正常工作时可能流过的最大电流有效值 I_{DM} 。考虑到元件的过载能力，一般留 1.5~2 倍的安全裕量，即 $I_F = (1.5 \sim 2) \frac{I_{DM}}{1.57}$ 取相应的标准系列值。

在额定结温下，取元件反向伏安特性（图 2-4）不重复峰值电压 U_{RSM} 的 80% 为反向重复峰值电压

U_{RRM} ，按 U_{RRM} 值取规定的电压等级作为该型号元件出厂时的额定电压。选择元件额定电压时，应为元件正常工作时可能承受的最大反向瞬时电压 U_{DM} 的 1.5~2 倍，即 $U_{RRM} = (2 \sim 3)U_{DM}$ ，取相应标准等级。

2.2.2 功率二极管的分类

根据实际应用场合，可以选择下列不同类型的功率二极管。

(1) 整流二极管

整流二极管要求通态正向压降低，工作电流可达几千安，反向阻断电压可达几千伏，但这种元件反向恢复时间较长。所以整流二极管常用于开关频率在 1kHz 以下的场合。其反向恢复时间较长，一般在 $5\mu s$ 以上，这在开关频率不高时并不重要。正向电流定额和反向电压定额可以达到很高，分别可达数千安和数千伏以上。

(2) 快速恢复二极管

快速恢复二极管的特点是反向恢复时间短，一般在 $5\mu s$ 以内，多用于与可控开关配合的高频电路中。

(3) 肖特基二极管

肖特基二极管是以金属和半导体接触形成的以势垒为基础的二极管，其反向恢复时间更短，一般为几十纳秒。它适用于输出电压较低和要求较低正向管压降（典型值为 0.3V）的换流电路中。

2.3 半控型器件——晶闸管及其应用

晶闸管是在晶体管基础上发展起来的一种大功率半导体器件。它的出现使半导体器件由弱电领域扩展到强电领域。

晶闸管也像半导体二极管那样具有单向导电性，但它的导通时间是可控的，主要用于可控整流、逆变、调压及开关等方面。

优点：体积小、重量轻、效率高、动作迅速、维修简单、操作方便、寿命长、容量大（正向平均电流达千安、正向耐压达数千伏）。

2.3.1 晶闸管的结构与性质

(1) 晶闸管的结构

晶闸管的外形如图 2-5 所示，符号及结构如图 2-6 所示。

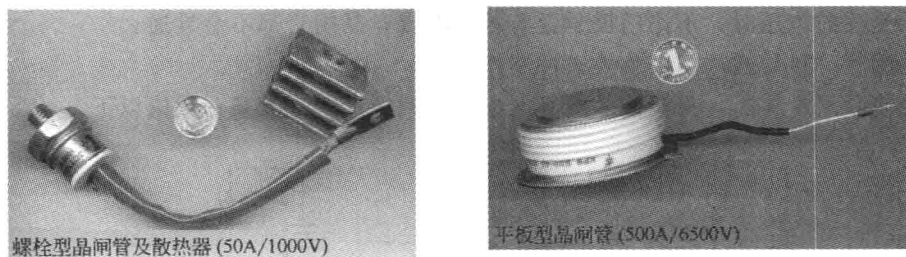


图 2-5 晶闸管的外形

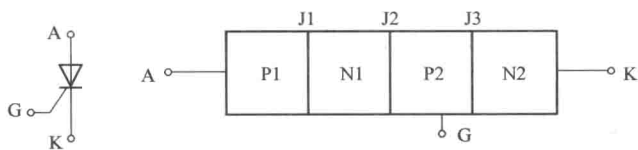


图 2-6 晶闸管的符号及结构

引出阳极 A、阴极 K 和门极（控制端）G 三个连接端。

对于螺栓型封装，通常螺栓是其阳极，能与散热器紧密连接且安装方便。

平板型封装的晶闸管可由两个散热器将其夹在中间。

(2) 晶闸管的工作原理

晶闸管的双晶体管模型及工作原理如图 2-7 所示。

$$I_{c1} = \alpha_1 I_A + I_{CBO1} \quad (2-1)$$

$$I_{c2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2} \quad (2-2)$$

$$I_K = I_A + I_G \quad (2-3)$$

$$I_A = I_{c1} + I_{c2} \quad (2-4)$$

式中， α_1 和 α_2 分别是晶体管 VT_1 和 VT_2 的共基极电流增益； I_{CBO1} 和 I_{CBO2} 分别是