

自动化技术入门与应用实例系列书

变频器控制技术

姚锡禄 主编

入门与应用实例

- “淡化”理论知识
- “强化”实际技能
- 以实际案例为基础
- 重点介绍新技术、新产品的应用



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

自动化技术入门与应用实例系列书

变频器控制技术 入门与应用实例

姚锡禄 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书深入浅出地讲述了变频器控制技术的基础理论,重点介绍了变频器的应用实例。首先简要介绍了变频调速技术的发展历程和应用技术对当前工业生产的现实意义。然后重点介绍了变频器控制技术的节能效果,并以西门子公司 MM440 变频器为典型,介绍了变频器电路结构及工作原理、基本运行方式、安装及维修知识。还介绍了变频器选择条件和由变频器为核心构成的调速系统及其功能。第六章到第十章通过实例介绍了变频器在电梯、机床、风机水泵、机电设备及部分生产线上的应用。

本书介绍的实例涉及面广,具有代表性。接线方案、参数设定介绍得比较详细,很有借鉴意义。

本书是变频器及其应用技术的入门读物,可供开发应用变频器的工程技术人员参考,也可作为大中专院校机电、自动化类专业学生实践教学的辅助教材。

图书在版编目(CIP)数据

变频器控制技术入门与应用实例/姚锡禄主编. —北京:中国电力出版社, 2009

(自动化技术入门与应用实例系列书)

ISBN 978-7-5083-8687-4

I. 变… II. 姚… III. 变频器—电气控制 IV. TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 052042 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 8 月第一版 2009 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15 印张 397 千字

印数 0001—3000 册 定价 28.00 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

前言

自动化技术入门与应用实例系列书 变频器控制技术入门与应用实例

《变频器控制技术入门与应用实例》为“自动化技术入门与应用实例系列书”之一，本书面向现代化工业技术从业的工程技术人员，是一本从入门讲起的实用技术书。本书基本特色是：对理论知识做“淡化”处理；对实际技能做“强化”处理；以具体的“案例”为基础，旨在使读者迅速掌握并灵活运用这一技术。

改革开放为我国经济插上了腾飞的翅膀，将我国打造为“世界工厂”，同时在环境保护和能源消耗上也遇到巨大的挑战，能源供应已经成为我国经济和社会可持续发展的“瓶颈”。“节能减排”将是一段时间内我国经济工作的基本国策。

解决生产过程中能耗高的问题，除其他相关的技术问题需要改进外，变频调速技术已成为节能及提高产品质量的有效措施，其重要性日益得到重视。电动机系统节能是国家启动的十大重点节能工程之一。推广变频器调速节能技术，可以获得比较满意的效果，应用变频器技术还可以改善生产工艺，提高产品质量和生产效率，提高自动化水平，因此变频器应用已普及工业生产各个基层环节。当前节约能源相关的产品发展备受关注，电动机系统节能是目前中国节能市场上最具有潜力的领域，而变频器是最具有代表性的产品。

本书深入浅出地介绍了通用变频器的结构、工作原理、控制方式、接线方案和安装要求等基础知识，用大量篇章介绍了变频器在各个行业的典型应用，这些宝贵的经验值得借鉴。本书是一本技术入门的读物，主要适用于生产一线技术工人以及工程技术人员。

全书共分十章，第一章介绍了变频器应用技术发展的概况；第二章介绍了通用变频器的电路结构、工作原理、控制方式和变频器分类，重点介绍了正弦脉宽调制的基本原理；第三章介绍了西门子 MM440 变频器起动、制动及各种基本运行的功能原理；第四章主要介绍通用变频器的技术特点及应用领域，变频器的驱动特性和选择条件；第五章介绍了变频器安装、接线、测量和维护的知识，以及变频器组网情况；第六章至第十章分别介绍了变频器在电梯、机床、起重机、水泵、风机、机电设备及各行业生产线上的应用。

本书由姚锡禄主编，第一、二、五、六章由姚锡禄编写，第三、七章由李志刚编写，第八、十章由董学彤编写，第四、九章由张文辉编写。全书由姚锡禄统稿，并由天津大学信息与控制研究所的王以直审稿。在本书编写过程中，得到了津酒集团姜德祥、赵景田，中鸥集团陈琪和西门子子公司天津办事处汪林，安徽省工业职业学院程周等人的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编者

目 录

自动化技术入门与应用实例系列书 变频器控制技术入门与应用实例

前 言

第一章 变频器应用技术发展的概况	1
第一节 交流变频技术的发展	1
一、应用变频器技术的意义	1
二、变频器技术的发展概况	3
三、变频器新技术及其发展方向	4
第二节 电力电子器件在变频器中的应用	5
一、电力电子器件的发展概况	5
二、电力电子器件的简单分类	6
三、变频器中常用的电力电子器件	7
四、其他电力电子器件	10
第三节 全数字微处理器在变频器中的应用	11
第二章 变频器的电路结构及工作原理	14
第一节 变频调速与变频器	14
一、变频调速的控制方式	14
二、变频器的基本构成	15
第二节 变频器的分类	17
一、按直流电源的性质分类	17
二、按输出电压调节方式分类	18
三、按控制方式分类	20
四、按电压等级分类	21
五、按用途分类	21
第三节 正弦波脉宽调制 (SPWM) 逆变器	22
一、正弦脉宽调制原理	23
二、同步调制与异步调制	24
三、谐波分析与输出电压调节	26
四、脉宽调制的控制方法	27
第四节 变频器的控制方式与性能	31
一、 U/f 控制	31
二、转差频率控制	33
三、矢量控制	35
四、直接转矩控制	39

第五节 高性能通用变频器	40
一、高性能通用变频器的类型	40
二、使用高性能变频器时的注意事项	44
第六节 高压变频器	46
一、功率开关器件	46
二、主电路拓扑结构	47
三、控制方式	50
四、高压变频器对电网与电动机的影响	51
第三章 变频器的运行	53
第一节 变频器的面板操作	53
一、MM440 变频器的面板介绍	53
二、面板的基本操作方法及功能	53
第二节 变频器的运行参数	56
一、常用频率参数	56
二、频率的给定	59
三、操作练习	60
第三节 变频起动	63
一、升速特性	63
二、起动方式	64
三、操作练习	64
第四节 变频制动	65
一、降速特性	65
二、制动方式	66
三、操作练习	67
第五节 变频器的运行方式	67
一、点动运行	67
二、正反转运行	69
三、瞬停再起运行	71
四、MM440 变频器多段速频率控制	72
五、同步运行	73
六、工频与变频运行	75
第四章 变频器构成的调速系统	77
第一节 变频器技术应用的特点	77
一、节能应用	77
二、提高生产率	79
三、提高产品质量	81
四、设备的合理化	81
五、适应或改善环境	82
六、应用变频器的技术优势	83

第二节 通用变频器的主要功能	84
一、系统所具有的功能	84
二、频率设定功能	86
三、与运行方式有关的功能	88
四、变频器常见的保护功能	89
五、与状态监测有关的功能	92
六、其他功能	92
第三节 生产机械的驱动	93
一、机械负载与电动机转矩	93
二、转速—转矩特性	93
三、变频器驱动不同负载时需要注意的问题	95
第四节 异步电动机的选择	99
一、异步电动机类型与容量的选择	99
二、负载功率的计算	102
三、选用异步电动机时的注意事项	104
四、变频器专用电动机的选择	106
第五节 变频器的选择	108
一、常用变频器的品牌及主要参数	108
二、变频器类型的选择	112
第六节 变频器容量的计算	115
一、连续恒载运转时所需变频器容量的计算	115
二、一台变频器驱动多台电动机并联运行时变频器容量的计算	116
三、大惯性负载起动时变频器容量的计算	116
四、多台电动机并联起动且部分电动机直接起动时变频器容量的计算	116
五、轻载时变频器容量的确定	117
六、变频器选择时的注意事项	117
第七节 变频器外围设备及其选择	117
第五章 变频器的安装与维护	122
第一节 变频器的安装	122
一、安装使用环境的要求	122
二、安装空间的要求	123
三、安装柜的设计及选择	124
四、变频器的防尘	127
五、变频器与电动机的距离	127
第二节 变频器的接线	128
一、主电路接线	128
二、控制电路的接线	130
第三节 变频器的测量	132
一、目前常见的测量仪表	132
二、变频器的测量与仪表的选择	133

三、输入侧的测量	133
四、输出侧的测量	134
第四节 变频器的调试与维护	135
一、通电前检查	135
二、通电与预置	135
三、带电动机空载试验	135
四、带负载调试	136
五、维护与检查	136
六、变频器的故障检修	138
七、故障排除案例	140
第五节 变频器的通信组网	142
一、变频器与 PLC 的连接	142
二、使用时的注意事项	146
三、变频器在现场总线控制系统中的应用	147
第六章 变频器在电梯上的应用	149
第一节 MM440 在电梯上的应用	149
一、系统配置	149
二、系统功能与原理	150
三、电动机和变频器主要参数设定	150
第二节 安川 VS-616G5 通用变频器电梯调速系统	151
一、变频器技术特性	151
二、变频器的配置及容量选择	151
三、电梯变频调速系统的构成	152
四、输入参数后对电动机自学习	153
五、电梯变频调速系统现场调试中的几个问题	154
第三节 电梯门的传动控制系统	155
第四节 森兰 SB80C 变频器在自动扶梯上的应用	155
一、改造方案	156
二、改造后的功能	156
三、控制原理	156
四、功能码设置	157
五、节能与优点	158
第七章 变频器在机床、起重机方面的应用	159
第一节 车床的变频器控制	159
第二节 变频器在龙门铣床、刨床上的应用	162
一、龙门铣床的变频改造	162
二、单臂龙门刨床走刀系统的变频改造	164
三、剃齿机的控制	166
第三节 升降吊车的控制	166
一、一般升降吊车的控制	166

二、变频调速技术在热镀锌起重行吊车中的应用	168
三、塔式起重机的控制	170
第四节 焦化桥式起重机的控制	172
一、原桥式抓斗起重机传动系统存在的问题	172
二、变频调速控制系统工作原理	172
三、变频调速传动系统的优点	175
第八章 变频器在水泵、风机控制方面的应用	177
第一节 概述	177
一、泵的基本特性	177
二、变频器控制泵时的几个问题	178
第二节 水泵控制应用的实例	179
一、排水泵	179
二、空调冷水泵控制	179
三、陈列柜水泵的控制	180
四、灌药泵的控制	180
第三节 变频恒压供水控制系统	181
一、变频恒压供水控制系统的工作原理	181
二、变频器的选型及功能预置	183
三、变频器的 PID 调节功能	184
第四节 智能型多功能控制器及 PLC 控制下的恒压供水系统	186
第五节 大型水泵高压变频调速节能技术	187
一、高压(中压)变频器在取水泵房的应用	187
二、工业水泵高压变频调速	188
第六节 风机类变频控制	189
一、冷却塔风扇的控制	189
二、发电厂锅炉送风机的控制	190
第七节 工业锅炉燃烧过程的变频调速系统	191
一、燃煤蒸汽锅炉燃烧过程	191
二、变频调速系统接线原理	192
三、变频器功能设定	192
第九章 变频器在机电设备中的应用	194
第一节 空调设备的变频器控制	194
一、中央空调系统的变频器控制	194
二、多重分隔空调的控制	195
三、房间空调的变频控制	196
四、变频调速装置在毛纺厂中央空调系统中的应用	197
五、楼房空调外调扇的控制	198
第二节 工业洗衣机、压缩机的变频器控制	199
一、工业洗衣机	199
二、压缩机	200

第三节 单相电容电机的变频控制	202
第十章 变频器在生产线上的应用	204
第一节 变频器在冶金生产方面的应用	204
一、炼钢转炉倾动和氧枪升降的应用	204
二、输送辊道的变频调速	207
三、无缝钢管热处理线变频控制系统	209
四、线材精轧机组上的变频控制	211
第二节 变频器在纺织行业的应用	215
一、变频器在涤纶高速纺丝技改中的应用	215
二、变频器在粗纱机上的应用	216
第三节 变频器在造纸机、胶片机及光缆护套机等方面的应用	218
一、变频器在造纸机上的应用	218
二、变频器在胶片机上的应用	220
三、变频器在光缆护套机上的应用	221
第四节 变频器在总线控制系统中的应用	223
一、变频器在 DeviceNet 网络中的应用	223
二、基于 Modbus - RTU 的变频器组网技术	225
参考文献	230



第一章

变频器应用技术发展的概况

内容提要：本章首先阐述了应用变频器技术的现实意义，以及对我国经济建设的影响，介绍了交流变频调速技术的发展概况和方向，并介绍了变频器的核心器件——电力电子器件和微处理器的发展概况。

第一节 交流变频技术的发展

一、应用变频器技术的意义

“变频器”指的是交流电动机的驱动控制器，在日本念成日式发音的 Iverter，在美国则称为 Drives，意思是电动机驱动装置。由于电力电子器件与微处理器的技术支持，使得该装置可以改变输入电动机电源的频率以达到控制电动机转速的目的，所以习惯上称为“变频器”（Frequency Converter）。

经过十多年的应用推广，变频调速技术在我国得到了飞速发展，变频器已广泛应用于国民经济的各个行业，促进了节能改造，极大地提高了我国工业电气传动水平。但目前，深入广泛应用变频器技术的推进力度还不够，变频器应有的潜能还远远没有充分发挥出来。我国的产值能耗是世界上最高的国家之一。据统计，目前我国电动机的总装机容量已达 4 亿万 kW，年耗电量约占全国用电量的 60%，但我国电动机驱动系统的能量利用率却非常低，基本上比国外平均水平低 20%。在风机、水泵、空气压缩机方面，我国大约有 4200 万台此类机械，装机容量约 1.1 亿万 kW，而实际情况大多是“大马拉小车”，无论轻载重载都以一种恒速的方式运行，实际工作效率只有 40%~60%，多数情况下，设备不能跟随工作状况的变化及时调整运行的速度，造成电能浪费，生产成本提高，效益降低，甚至造成环境污染。据统计，提高泵、风机系统运行效率的节能潜力达（200~400）亿 kWh，相当于 4~8 个装机容量为 1000MW 级的大型火力发电厂的发电总量。解决生产过程中能耗高的问题，除其他相关的技术问题需要改进外，变频调速技术已成为节能及提高产品质量的有效措施，其重要性日益得到重视，电动机系统节能是国家发展和改革委员会（简称发改委）启动的十大重点节能工程之一，规划要求，推广变频调速节能技术，风机、水泵、压缩机等通用机械系统采用变频调速节能措施，工业机械采用交流电动机变频工艺调速技术，在“十一五”期间，实现电动机系统运行效率提高 2 个百分点，形成年节电能力 200 亿 kWh。中国经济起飞，所需能源极大，而面对传统能源（煤、石油等）逐渐减少，世界市场油价飞涨，地球温升恶化等情况，“节约能源”、“绿色环保”已从道德层面的呼吁，升级为经济行为的“必须”。节约能源相关的产品发展备受瞩目，电动机系统节能是目前中国节能市场上最具有潜力的领域，而变频器是最具有代表性的产品。

应用变频调速技术的另一巨大优势是改善工艺水平，提高产品质量。许多行业中，生产过程不仅要求速度控制精度高，还要求有快速的、精确的力矩控制性能。例如金属加工行业中的带材

轧制过程，线材轧机、拉丝机械、铣面、纵剪、复合加工、连铸连轧等，这些工艺过去常常要求多台电动机之间要有精确的速度配合，或是要求力矩能快速地跟随负载的变化而变化。这些特性同时也是造纸、纺织印染、化纤、橡塑、胶片制备等行业所需要的。其产品的质量和产量除了与加工机械有关外，还依赖于电气传动设备以及电气控制系统的水平，由高性能变频器所构成的变频调速系统恰是当今最先进的应用系统，其各项技术指标均能满足上述加工的工艺过程。

还有一些对控制要求特殊的应用，例如提升机的应用，不仅要有精确的速度控制特性，还要有极好的力矩控制特性。因为这一类纯位势负载的特性是，被提升物一旦离开地面便没有了依托，物体在悬空状态下的升降或停止完全靠电气传动进行控制，起安全保护作用的抱闸的开闭必须有精确的控制，且传动必须能记忆提升力矩，以配合抱闸的开闭实现无跳变的速度控制过程，避免溜车造成损害。有类似要求的应用场合还有电梯、立体仓库的物料运输机、高炉的卷扬机等设备。满足这类应用场合，除要求变频调速系统的硬件过硬外，还要有特殊的专用软件，专门适用这类负载的全部控制需要。

特殊应用中的另一大类是张力控制，张力控制的主要应用对象是卷取机，卷取机是卷取各种成品或半成品的生产机械设备，一般都处于生产线最后一道工序，直接影响成品或半成品的质量，因此是关键性设备之一。除一些技术指标如速度的同步性、精度、稳定性等要求比较高以外，其卷取的工艺过程又有特殊性，必须结合被卷取的物料特性、厚薄程度、物料强度、延伸率弹性变形量、物料的允许公差，卷取物料的直径变动量、质量，卷取速度等诸多因素综合考虑。涉及此技术的行业有各类薄膜生产厂，例如胶片、塑料薄膜等，造纸、化纤生产、冶金行业中的各类薄板，有色金属拉丝等，应用十分广泛。

正是这些实际生产的技术要求，迫使变频器调速技术不断进步、不断创新，每当变频技术取得某些突破，都使得生产工艺水平登上一个新的台阶，这种生产要求与技术进步的互动，使得变频技术迅猛发展，成为自动化领域最热点之一。表 1-1 列出了一些变频器的应用领域。

表 1-1 使用变频器的目的和应用领域举例

序号	变频器传动的效能	应用领域	主要相关技术	适用变频器
1	节能	风扇、送风机、泵、提升机、挤压机、搅拌机、传送带、工业用洗衣机	为提高运行可靠性，台数控制和调速控制并用	通用变频器
2	提高生产率	提升机、起重机、机床、食品机械、挤压机和自动仓库中所需的传动	运行程序或加工工艺的最佳速度，原有设备的增速运行运转可靠性提高	通用变频器、专门用途的通用变频器
3	产品质量的提高	风扇、送风机、泵、机床、食品机械、造纸机、薄膜生产线、钢板加工生产线、印制电路板基板钻孔机、高速刻纹机	平滑加减速，加工对象所需最佳速度选定高精度转矩控制，高精度定位停止，无转矩脉动，高速传动	通用变频器、系统用矢量控制式通用变频器，高速通用变频器
4	设备合理化，少维护，低成本，机械的标准化，机械的简单化，全自动化（FA）	搬送机械，金属加工机械、纤维机械，造纸生产线、薄膜生产线、钢板加工生产线	原有设备的增速运行，高精度转矩控制，多台电动机联动运行，多台电动机联动比例运行，提高运转可靠性，传送控制	通用变频器、通用矢量控制变频器、系统用矢量控制变频器
5	改善或适应环境	空调机、风扇、送风机、压缩机、电梯	静音化，平滑加减速，使用防爆电动机、安全性等技术	通用变频器、专用型通用变频器

二、变频器技术的发展概况

变频器用于交流异步电动机调速,其性能远远超过以往任何交、直流调速方式,而且其结构简单、调速范围宽、调速精度高、安装调试、使用方便、保护功能完善、运行稳定可靠、节能效果显著,是交流电动机调速的主流技术。变频器是运动控制系统中的功率变换器,当今的运动控制系统是综合了多种学科的高新技术领域,是自动化技术的“前沿”,总的发展趋势是:驱动的交流化,功率交换的高频化,控制技术的数字化、智能化和网络化。因此,变频器作为系统的重要功率变换部件,提供可控的高性能变压变频交流电源,必然会伴随着系统技术发展而发展。

变频器技术自诞生到广泛应用已有四十多年的历史,其飞速发展主要得益于以下三个方面:

(1) 诞生于 1956 年的电力电子技术经数十年的发展,已进入了现代电力电子技术阶段,已制造出高耐压大功率、具有自关断能力的全控型电力电子器件,并且具有驱动功率小、开关频率高的特点,应用在逆变电路中,极大地提高了变频的性能,应该说高性能的电力电子器件为变频技术提供了良好的“硬件”条件。

(2) 20 世纪 50 年代后,计算机技术介入工业控制,世界工业由“硬件年代”过渡到“软件年代”,70 年代后,微电子集成技术高速发展,各种高性能、大容量的微处理器相继问世,并应用在变频器控制电路中,极大地完善了变频器的各种功能,提高了变频器的性能。全数字微机控制技术,使变频器减小了体积,降低了成本,提高了效率,并且使变频器具有通信功能,使之更趋智能化、网络化,使变频器技术跨进了一个全新的阶段。

(3) 1964 年德国人 A. Schönung 和 H. Stemmler 首先提出把通信技术中的脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 技术应用到交流传动中,从此对 PWM 调速技术的研究引起了人们的高度重视。20 世纪 80 年代初,日本学者提出了基于磁通轨迹的磁通轨迹控制方法,该方法以三相波形的整体生成效果为前提,以保持电动机气隙磁通恒定为目的,一次生成两相调制波形,使变压变频 (Variable Voltage Variable Frequency, VVVF) (或称 U/f 控制) 技术成为变频调速的核心,并使变频器成为当时工业控制的“新宠”。自变频器开始在工业中应用至今,其控制技术大致经历了几次大的发展,每一次突破性的进展,都会推出一个更先进的控制原理,使变频器功能更完善,性能更优越。变频器控制技术的发展大致经历了三个阶段。

1) 第一阶段,20 世纪 70 年代。以恒压频比 ($U/f=C$, C 为常数) 控制方式为理论基础的变频调速,可以做成转速开环或转速闭环的变频调速系统。开环系统在恒压频比控制的基础上,增加了变频器低频段的电压补偿,以改善电动机的低速力矩特性。为了改善电动机机械特性的硬度,增加了转差补偿控制,虽然结构简单,成本较低,但其动、静态性能不高。为了改善性能,在开环的基础上,增加了 PI 型转速调节器,形成单闭环系统,以使转速无静差,改善静态性能。在动态过程中,转速调节器饱和,系统能以最大转矩 T_m 加减速,保证了在允许条件下的快速性和加减速的平滑性,系统也容易稳定。然而,此类转差频率控制是以电动机稳态为基础的,其动态性能与理性的闭环控制指标仍存在一定差距。此类变频器常用于风机、水泵类节能型调速系统或对速度的动态指标要求不高的简单机械传动上。

2) 第二阶段,20 世纪 80 年代。矢量控制型变频器成功地应用在需要高精度转速控制的系统上,使交流变频调速系统取代直流调速系统得以实现。

1968 年德国人 Hasse 首先提出了磁场定向控制 (Field Orientation) 理论,1971 年德国人 F. Blaschke 以专利文献的形式提出了异步电动机转子磁场定向矢量控制的方法,并通过直流电动机与交流电动机的比较分析阐述了这一原理,该理论提出对磁链和电磁转矩分别采用闭环控制,实现电流和磁场的解耦,进一步实现了转子磁场定向矢量控制,使异步电动机的控制特性与他励直流电动机相似,从而使异步电动机的调速控制理论前进了一大步。这种系统可以实现很快的转

矩响应速度和很高的速度、转矩控制精度,但需要依赖于精确的电动机数字模型和对电动机参数的自动辨识,通过自动辨识确立电动机实际的定子阻抗、饱和因数、电动机惯量等重要参数,然后根据精确的电动机模型,估算出电动机的实际转矩、定子磁链和转子转速,并由磁链和转矩的控制产生 PWM 信号对逆变器的开关状态进行控制。1980 年德国人 Leonhard 等在应用微处理器的矢量控制研究中取得了进展,促进了矢量控制技术的实用化。

矢量控制型变频器依靠计算机的快速数据处理能力,将连续的定子电流经过坐标变换,分解成建立磁场的励磁分量和与磁场正交的产生转矩的转矩分量,然后分别进行各自的闭环控制,就像直流电动机可以分别对励磁和电枢电流进行控制一样,从而使得交流电动机得到如同直流电动机的控制规律和动态性能。从控制角度看,矢量控制的变换机理需要测速元件,以测量转子的瞬时状态来确定转子磁链的位置。从应用角度看,要提高传动系统的控制精度,就需要精确测量转子的转速,构成速度闭环控制。但速度传感器安装要求高,机械调试工作量大,由于场地及空间限制,有些装置不允许安装速度传感器,于是 20 世纪 90 年代以后,许多公司纷纷推出无速度传感器的高性能交流调速系统,基本上能克服这些缺点。无速度传感器系统的初始方法是实时检测电动机定子电压和电流,再依据电动机模型对转速直接进行估算,用估算的值作为内部速度反馈量,完成高精度的速度控制,因此提高转速估算精度是该系统的关键。

3) 第三阶段。采用目前最先进的变频控制理论——直接转矩控制构成交流传动系统。直接转矩控制 (Direct Torque Control, DTC), 英文也称为 Direct Self Control (DSC), 直译为直接自控制,这种自控制以转矩为中心来进行综合控制,不仅控制转矩,也用于磁链的自控制。直接转矩控制与矢量控制区别是:它不是通过控制电流、磁链等量间接控制转矩,而是把转矩直接作为被控量控制,其实质是用空间矢量的分析方法,以定子磁场定向方式,对定子磁链和电磁转矩进行控制。1985 年德国鲁尔大学的 M. Depenbrock 首先提出了基于六边形乃至圆形磁链轨迹的直接转矩控制理论,这种方法不需要复杂的坐标变换,而是直接在电动机定子坐标上计算磁链的模和转矩的大小,并通过磁链和转矩的直接跟踪,实现脉宽调制和系统的高动态性能。1995 年 ABB 公司首先推出直接转矩控制变频器,其控制思路简单明了,控制性能卓越,动态转矩响应时间小于 2ms,带速度传感器时的静态速度精度达 $\pm 0.001\%$,在不带速度传感器的情况下即使受到输入电压变化或负载突变的影响,同样可以达到 $\pm 0.1\%$ 的速度控制精度,很快深入到工业应用的各个领域。

三、变频器新技术及其发展方向

1. 变频器新技术

伴随着变频器日益广泛的应用,其性能和技术也在飞速发展,主要体现在以下方面:

(1) 模块化。新型变频器的模块化已经取得了很大进展,例如日立公司的通用变频器专用集成功率模块 (ISPM),将整流电路、逆变电路、逻辑控制电路、驱动和保护电路、电源回路全部集成在一个模块内,使整机的元器件数量比原来减少了 40% 以上,可靠性得到很大提高。

(2) 专用化。为更好地发挥其控制技术的独特功能,并尽可能满足现场控制的需要,新型变频器派生了许多专用机型,例如风机、水泵、空调专用型,注塑机专用型,电梯专用型,纺织机械专用型,中频驱动专用型,机车牵引专用型等。

(3) 软件化。新型变频器的功能软件化已进入了实用阶段,通过内置软件编程可实现所需的功能。变频器内置多种可选的应用软件,以满足现场过程控制的需要,如 PID 控制软件、张力控制软件、同步控制软件、速度跟随软件、变频器调试软件、通信软件等。

(4) 网络化。新型变频器内装 RS485 接口,可提供多种兼容的通信接口,支持多种不同的通信协议,可由计算机控制和操作变频器,通过选件可与 Lonworks、Interbus、DeviceNet、Modbus、Profibus、Ethernet、CAN 等多种现场总线联网通信。并可通过提供的选件支持上述几

种或全部类型的现场总线。例如,西门子 MM4 系列通用变频器可以通过 USS 通信协议连接调试和控制多达 31 台变频器。

(5) 低电磁噪声、静音化。新型变频器采用高频载波 SPWM 方式实现静音化。在逆变电路中,采用电流过零开关控制技术等,以改善波形,降低谐波,在电磁兼容性(EMC)方面符合国际标准,实现清洁电能变换。

(6) 图形化用户界面。新型变频器的操作面板除了通常的下拉式菜单外,还提供图形工具、中文菜单等监控操作功能。

(7) 引导式调试步骤。新型变频器机内固化调试指南、引导操作者的调试步骤,无需记忆参数,充分体现了易操作性。随着变频器技术的发展,变频器参数自调整将实用化。

(8) 参数趋势图形。新型变频器的参数趋势图可显示实时运行状态,在调试过程中可随时监控和记录运行参数。

2. 变频器未来的发展方向

(1) 进一步提高控制理论,发展控制策略。尽管矢量控制与直接转矩控制使交流调速系统的性能有了较大的提高,但是还有许多领域有待深入研究。未来的变频器控制技术将在现有的基础上得到进一步发展,将融入基于现代控制理论的模型参考自适应技术、多变量解耦控制技术、最优控制技术和基于智能控制技术的模糊控制、神经网络、专家系统和过程自寻优、故障自诊断技术等,使变频器“傻瓜”化,更容易使用。

(2) 高速全数字化控制。随着以 32 位高速微处理器为基础的数字控制器的应用,新型电力电子器件应用技术、Windows 操作系统以及各种 CAD 软件、通信软件被引入到变频器控制技术中,使得各种控制算法、参数自设定、自由设计控制功能、图形编程技术等数字化控制技术能够实现。

(3) 新型电力电子器件的应用技术。随着新型电力开关器件的发展,可关断驱动技术,双 PWM 逆变技术,柔性 PWM 技术,全数字自动化控制技术,静、动态均流技术,浪涌吸收技术,光控及电磁触发技术,导热与散热技术将得到迅速发展。

(4) 变频器的大容量化和小体积化。随着新型电力电子器件的发展,智能型功率模块的应用,变频器的大容量化和小体积化会逐步实现。

(5) 更符合环境保护要求,成为真正的“绿色产品”。变频器的电磁兼容技术越来越受到重视。人们在解决了变频器低频噪声的基础上,正在探索解决变频器的电磁辐射和谐波污染问题,并已取得了积极的成果。相信在不久的将来,“绿色产品”的变频器将会展示在人们面前。

第二节 电力电子器件在变频器中的应用

由于电力电子器件是变频器中的核心器件,其性能对变频器的内在品质起到至关重要的作用。

一、电力电子器件的发展概况

通常认为,1956 年第一个普通晶闸管(SCR)的发明标志着电力电子技术的诞生,开创了利用半导体器件及电子技术控制电气设备运行的先河。1957~1980 年称为传统电力电子技术阶段,这一阶段,虽然电力电子器件已由普通晶闸管衍生出了快速晶闸管(KK)、逆导晶闸管(RCT)、双向晶闸管(TRIAC)、不对称晶闸管(ASCR)等,但是它们存在两个共同的缺陷:①控制功能上的欠缺,通过门极只能控制开通而不能控制关断,所以成为半控型器件,如果要想关断,必须增加比较复杂的强迫换流电路,从而使电路“臃肿”而效率降低;②工作频率低,一般晶闸管工作频率均低于 400Hz,因而大大限制了其应用范围,这些电子器件无法应用在通用变

变频器中。由于大容量晶闸管制造工艺相对简单,并且具有较好的耐过流特性,现在主要应用在可控整流,大功率、低速的交—交变频装置中和交流串级调速装置中。

20世纪70年代后期,可关断晶闸管(GTO)和电力晶体管(GTR)相继产生并实用化,为通用变频器大规模普及应用带来了曙光。20世纪80年代,绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的开发成功并进入实用阶段,使变频器产生了质的飞跃。IGBT在许多性能上优于GTR,并且逐步取代了GTR,可以说IGBT为变频调速的迅速普及和进一步提高奠定了基础。此后各种高频化全控型器件如雨后春笋般地不断问世,并得到迅速发展,而IGBT也逐步完成集成化、模块化过程。新型电力电子器件的产生使电力电子技术由传统阶段跨入了现代阶段。

现代电力电子技术在器件、电路及其控制技术方面有如下特点:

- (1) 集成化。几乎所有全控型器件都由许多单元胞管子并联而成,即一个器件由许多子器件所集成。例如:一个1000A的GTO含有近千个单元GTO,一个40A的功率场效应晶体管(MOSFET)由上万个单元并联而成。
- (2) 高频化。一般的IGBT工作频率均达到20kHz,而功率MOSFET可达数百千赫,静电感应晶体管(SIT)工作频率可达10MHz以上。
- (3) 全控化。电力电子器件实现全控化,即自关断化,是现代电力电子器件在功能上的重大突破。无论是双极型器件(如GTR、GTO)或单极型器件(如MOSFET)以及混合型器件[如IGBT、MOS控制晶闸管(MCT)],都实现了全控化,从而避免了传统电力电子器件关断时所需要的强迫换流电路。
- (4) 控制电路弱电化、控制技术数字化。全控型器件的高频化促进了电力电子控制电路的弱电化。许多弱电领域的电子技术可以应用到电力领域中来,如PWM调制技术、谐振变流等,控制这些电路的技术也逐步数字化。

二、电力电子器件的简单分类

电力电子器件的分类方法很多,常见的分类有如下几种。

1. 根据不同的开关特性分类

- (1) 不控型器件。这种器件通常为两端器件,一般只有整流的作用而无可控的功能,如整流二极管、肖特基势垒二极管等。
- (2) 半控型器件。这种器件通常为三端器件,只能控制其开通而不能控制其关断,普通晶闸管(SCR)及其大部分派生器件属这一类。
- (3) 全控型器件。这种器件也为三端器件,通过控制信号既可以控制其开通,又可以控制其关断,主要有GTR、GTO、IGBT及大部分新型的电力电子器件。

2. 根据器件内参与导电的载流子情况分类

- (1) 双极型。凡由电子和空穴两种载流子参与导电的称为双极型器件,如普通晶闸管、电力晶体管等。
- (2) 单极型。凡只有一种载流子参与导电的称为单极型器件,大部分场控器件属单极型,如功率MOSFET。
- (3) 混合型。由单极型和双极型两种器件组成的复合型器件称为混合型器件,如IGBT、MCT等。

3. 根据控制信号不同分类

- (1) 电流控制型。这种器件一般通过控制极的电流变化来控制器件的开通或关断,有时也称为电流驱动型。应用比较广泛的电流控制器件有两大类:①晶体管类,如GTR、达林顿晶体管等,这类器件适用于500kW以下,380V交流供电的领域;②晶闸管类,如SCR、GTO等,这

类器件适用于电压更高、电流更大的应用领域。

电流控制型器件的共同特点是：

1) 器件内有两种载流子导电，当管子由导通转向截止时，两种载流子在复合过程中产生热量，使器件结温升高，过高的结温限制了工作频率的提高。因此，电流控制器件比电压控制型器件的工作频率要低。

2) 电流控制型器件具有电导调制效应，使其导通压降很低，导通损耗较小，这是电流控制型器件的一大优势。

3) 此类器件的控制极输入阻抗较低，因此驱动电流和控制功率较大，其电路也比较复杂。

(2) 电压控制型。这种器件的开通和关断是由电压信号进行控制的，如功率 MOSFET、IGBT 和 MCT 等。从广义上讲，一切用场控原理进行控制的电力电子器件均属电压控制型，因此电压控制型器件也称为场效应电力电子器件或场控电力电子器件。

三、变频器中常用的电力电子器件

电力电子器件在变频器的主电路中起核心作用，变频器的发展刺激并调动了对电力电子器件的研究与发展，而电力电子器件的发展则进一步推动了变频器发展和水平的提高。目前变频器市场新品不断涌现，在这里介绍一下运行中和市场上多数变频器中常用的电力电子器件。

1. 电力晶体管 (GTR)

电力晶体管 (GTR—Giant Transistor) 又称大功率双极型晶体管 (BJT—Bipolar Junction Transistor)。其研制、开发大约开始于 1974 年，大规模应用在 20 世纪 70 年代后期。GTR 属电流控制型电力电子器件，目前已应用有 1400V/800A 的器件。

单个 GTR 的放大系数很小，一般只有 10 倍左右，通常采用至少两个晶体管，按达林顿接法组成单元结构。一个成品 GTR 要由许多这种单元结构并联而成。

图 1-1 所示为富士公司生产的 EV1298 型 GTR 的内部线路，它只相当于一单元模块，电路中 VD1 为续流二极管，VD2、VD3 为加速二极管， R_1 、 R_2 、 R_3 均为电阻，电流增益可达 10000 左右。单元模块可分为一单元、二单元、四单元和六单元模块。通常四单元模块可构成单相桥式电路，而六单元结构可构成三相桥式电路。不同单元的简化结构如图 1-2 所示。

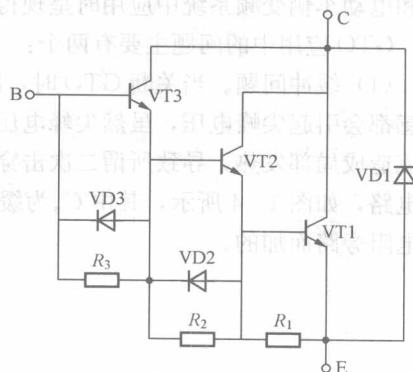


图 1-1 EV1298 型 GTR 的内部线路

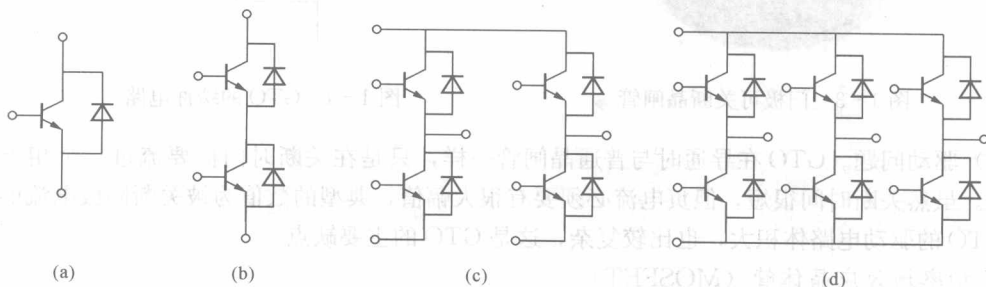


图 1-2 模块化 GTR 的内部简化结构

(a) 一单元模块；(b) 二单元模块；(c) 四单元模块；(d) 六单元模块