



高职高专机电一体化专业规划教材

变频器原理及应用

BIANPINQI YUANLI JI YINGYONG

徐海 施利春 主编
孙佃升 王东辉 副主编



赠送
电子课件

本书特色

- ❁ 结构严谨，内容丰富，实用性强。
- ❁ 理论知识阐述条理清晰，详简得当，易于掌握。
- ❁ 注重理论与实践相结合、理论与经验相结合、经验与技术相结合。



清华大学出版社

高职高专机电一体化专业规划教材

变频器原理及应用

徐海 施利春 主编

孙佃升 王东辉 副主编

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书从变频器使用者的角度出发,从理论到实践,由浅入深地阐述了变频调速的基础知识、常用电力电子器件介绍和选用、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;重点阐述了变频器的操作、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。

本书注重实际、强调应用、结构合理、通俗易懂、取材新颖、叙述清晰,可作为高职高专院校工业自动化、电气工程及自动化、机电一体化、自动控制及其他相关专业的教材,同时也可供相关专业工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

变频器原理及应用/徐海,施利春主编;孙佃升,王东辉副主编.——北京:清华大学出版社,2010.9
(高职高专机电一体化专业规划教材)

ISBN 978-7-302-23268-1

I. ①变… II. ①徐… ②施… ③孙… ④王… III. ①变频器—高等学校:技术学校—教材
IV. ①TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 145449 号

责任编辑:孙兴芳

装帧设计:杨玉兰

责任校对:王 晖

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:20 字 数:482 千字

版 次:2010 年 9 月第 1 版 印 次:2010 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:32.00 元

产品编号:032395-01

前 言

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、改善功用流程、提高产品质量和便于自动控制等诸多优点，被国内外公认为最有发展前途的调速方式。

本书是一门实践性较强的综合性课程的教材。通过本课程的理论教学和实践教学，能够使学生掌握电力电子器件、变频调速技术、变频器的应用与维护技术等多学科综合知识与基本技能，具备变频调速系统的设计、安装、调试、维护及设备改造的综合应用能力。本课程教学内容包括变频技术概述、常用电力电子器件介绍、变频调速原理、电动机变频调速机械特性、变频调速技术的应用、变频器的选择和参数设置、变频器的安装与调试等方面内容。

本书由徐海和施利春任主编，徐海编写前言、第2章、第4章、第6章、第8章，施利春编写第9章；孙佃升和王东辉任副主编，孙佃升编写第3章和第5章，王东辉编写第1章和第7章；刘成恩参与编写附录等。

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商提供的产品资料，在此一并表示真诚的感谢！

限于编者水平，不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

| | | | |
|-------------------------------------|----|--------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论..... | 1 | 2.2.1 晶闸管的外形和图形符号..... | 13 |
| 1.1 通用变频器的发展过程..... | 1 | 2.2.2 晶闸管的工作原理..... | 13 |
| 1.1.1 通用变频器的应用范围不断 扩大..... | 2 | 2.2.3 晶闸管的阳极伏安特性..... | 14 |
| 1.1.2 通用变频器使用的功率器件 不断更新换代..... | 2 | 2.2.4 晶闸管的参数..... | 15 |
| 1.1.3 控制方式不断发展..... | 3 | 2.2.5 晶闸管的门极伏安特性 及主要参数..... | 16 |
| 1.1.4 PWM 控制技术进一步 发展..... | 3 | 2.3 门极可关断晶闸管..... | 17 |
| 1.2 变频器的发展趋势..... | 4 | 2.3.1 GTO 晶闸管的结构..... | 17 |
| 1.2.1 高水平的控制..... | 5 | 2.3.2 GTO 晶闸管的工作原理..... | 17 |
| 1.2.2 主电路逐步向集成化、高频化 和高效率发展..... | 5 | 2.3.3 GTO 晶闸管的特性..... | 18 |
| 1.2.3 控制量由模拟量向数字量 发展..... | 5 | 2.3.4 GTO 晶闸管的主要参数..... | 19 |
| 1.2.4 向多功能化和高性能化 发展..... | 6 | 2.4 电力晶体管..... | 20 |
| 1.2.5 向大容量和高压化发展..... | 7 | 2.4.1 GTR 的结构..... | 20 |
| 1.3 变频器的应用..... | 7 | 2.4.2 GTR 的主要参数..... | 21 |
| 1.3.1 变频器在节能方面的应用..... | 7 | 2.4.3 二次击穿现象..... | 21 |
| 1.3.2 变频器在自动化系统中的 应用..... | 7 | 2.4.4 GTR 的驱动电路模块..... | 22 |
| 1.3.3 变频器在提高工艺水平和 产品质量方面的应用..... | 8 | 2.5 电力场效应晶体管..... | 22 |
| 本章小结..... | 8 | 2.5.1 电力场效应管的结构与工作 原理..... | 23 |
| 思考与练习..... | 8 | 2.5.2 电力 MOSFET 的特性..... | 24 |
| 第 2 章 电力电子器件..... | 10 | 2.5.3 电力 MOSFET 的主要 参数..... | 25 |
| 2.1 电力二极管..... | 10 | 2.6 绝缘栅双极型晶体管..... | 26 |
| 2.1.1 结构与伏安特性..... | 10 | 2.6.1 IGBT 的结构与基本工作 原理..... | 26 |
| 2.1.2 主要参数..... | 11 | 2.6.2 IGBT 的基本特性..... | 27 |
| 2.1.3 电力二极管的参数选择及 使用注意事项..... | 12 | 2.6.3 IGBT 的主要参数..... | 29 |
| 2.2 晶闸管..... | 13 | 2.6.4 IGBT 的驱动电路..... | 30 |
| | | 2.7 集成门极换流晶闸管..... | 30 |
| | | 2.7.1 IGCT 的结构..... | 30 |
| | | 2.7.2 IGCT 的特点..... | 31 |
| | | 2.8 MOS 控制晶闸管..... | 32 |
| | | 2.8.1 MCT 的结构与工作原理..... | 32 |
| | | 2.8.2 MCT 的主要参数..... | 33 |



| | | | |
|------------------------------|-----------|----------------------------|------------|
| 2.9 静电感应晶体管..... | 33 | 4.2 异步电动机的机械特性与运行..... | 69 |
| 2.9.1 SIT 的基本结构和工作原理..... | 33 | 4.2.1 异步电动机的机械特性..... | 69 |
| 2.9.2 SIT 的特性..... | 34 | 4.2.2 异步电动机的运行..... | 70 |
| 2.9.3 SIT 的极限参数..... | 34 | 4.2.3 异步电动机的调速..... | 72 |
| 2.10 智能功率模块..... | 35 | 4.3 负载的机械特性..... | 73 |
| 本章小结..... | 36 | 4.3.1 恒转矩负载..... | 74 |
| 思考与练习..... | 36 | 4.3.2 恒功率负载..... | 75 |
| 第 3 章 变频技术..... | 37 | 4.3.3 二次方律负载..... | 76 |
| 3.1 整流电路..... | 37 | 4.4 拖动系统与传动机构..... | 77 |
| 3.1.1 不可控整流电路..... | 38 | 4.4.1 拖动系统..... | 77 |
| 3.1.2 可控整流电路..... | 39 | 4.4.2 传动机构的作用及系统参数..... | 78 |
| 3.2 中间电路..... | 46 | 本章小结..... | 79 |
| 3.3 逆变电路..... | 48 | 思考与练习..... | 79 |
| 3.3.1 逆变电路的工作原理..... | 48 | 第 5 章 变频器的控制方式..... | 81 |
| 3.3.2 电压型和电流型逆变电路..... | 49 | 5.1 变频器的基本类型..... | 81 |
| 3.3.3 单相半桥逆变电路..... | 50 | 5.1.1 按主电路工作方式分类..... | 81 |
| 3.3.4 单相全桥逆变电路..... | 51 | 5.1.2 按开关方式分类..... | 82 |
| 3.3.5 三相桥式逆变电路..... | 52 | 5.1.3 按工作原理分类..... | 84 |
| 3.4 SPWM 控制技术..... | 55 | 5.1.4 按用途分类..... | 85 |
| 3.4.1 SPWM 控制的基本原理..... | 55 | 5.2 变频器的控制方式..... | 87 |
| 3.4.2 PWM 逆变电路的控制方式..... | 57 | 5.2.1 U/f 控制..... | 87 |
| 本章小结..... | 61 | 5.2.2 转差频率控制..... | 89 |
| 思考与练习..... | 61 | 5.2.3 矢量控制通用变频器..... | 90 |
| 第 4 章 电机与电力拖动..... | 62 | 5.2.4 直接转矩控制..... | 98 |
| 4.1 异步电动机..... | 62 | 5.3 高压变频器..... | 104 |
| 4.1.1 异步电动机的工作原理..... | 62 | 5.3.1 主电路的拓扑结构..... | 105 |
| 4.1.2 异步电动机的铭牌参数..... | 63 | 5.3.2 控制方式..... | 109 |
| 4.1.3 电动机的工作制..... | 65 | 5.3.3 高压变频器对电网与电动机的影响..... | 110 |
| 4.1.4 变频有效输出值..... | 65 | 本章小结..... | 111 |
| 4.1.5 电动机容量的选择..... | 66 | 思考与练习..... | 111 |
| 4.1.6 异步电动机的等效电路及其平衡方程式..... | 66 | 第 6 章 变频器参数与选择..... | 112 |
| 4.1.7 异步电动机的功率及转矩..... | 68 | 6.1 变频器的原理框图与接线端子..... | 112 |
| | | 6.1.1 变频器的外形与结构..... | 112 |
| | | 6.1.2 变频器的原理框图..... | 113 |
| | | 6.1.3 变频器与外部连接的端子..... | 114 |

| | | | |
|---------------------------------------|-----|--------------------------------|------------|
| 6.2 变频器的操作与运行 | 115 | 6.7.4 升速与降速控制 | 152 |
| 6.2.1 面板配置(FR-PZ02-02)及 键盘简介 | 115 | 6.7.5 变频与工频切换的 控制电路 | 154 |
| 6.2.2 功能结构及预置流程 | 116 | 6.8 变频器与 PLC 的连接 | 155 |
| 6.2.3 运行操作 | 121 | 6.9 变频器与 PC 的通信 | 157 |
| 6.3 功能及参数 | 125 | 本章小结 | 160 |
| 6.3.1 频率的给定功能 | 125 | 思考与练习 | 160 |
| 6.3.2 频率控制功能 | 128 | 第 7 章 变频器的安装与维护 | 161 |
| 6.3.3 启动、升速、降速、制动 功能 | 129 | 7.1 变频器的安装 | 161 |
| 6.3.4 PID 调节功能 | 132 | 7.1.1 主电路控制开关及导线线径 选择 | 161 |
| 6.3.5 保护功能 | 136 | 7.1.2 变频器的安装环境 | 162 |
| 6.3.6 变频器控制方式 | 137 | 7.1.3 安装方向和空间 | 163 |
| 6.4 负载和操作模式、电机选择 | 138 | 7.1.4 变频器在多粉尘现场的 安装 | 163 |
| 6.4.1 适用负载选择 | 138 | 7.1.5 安装布线 | 164 |
| 6.4.2 操作模式选择 | 138 | 7.2 变频器的抗干扰及抑制 | 166 |
| 6.4.3 使用电机选择 | 139 | 7.2.1 对变频器的干扰 | 166 |
| 6.5 变频器的选择 | 139 | 7.2.2 变频器产生的干扰 | 167 |
| 6.5.1 风机、泵类负载变频器的 选择 | 139 | 7.2.3 抑制变频器干扰的措施 | 167 |
| 6.5.2 机械传动系统变频器的 选择 | 141 | 7.3 变频调速系统的调试 | 170 |
| 6.5.3 变频器容量计算 | 143 | 7.3.1 通电前的检查 | 170 |
| 6.6 变频调速系统的主电路及电器 选择 | 144 | 7.3.2 通电检查 | 171 |
| 6.6.1 变频调速系统主电路的 结构 | 144 | 7.3.3 空载试验 | 171 |
| 6.6.2 断路器 | 145 | 7.3.4 带负载测试 | 172 |
| 6.6.3 接触器 | 145 | 7.4 变频器的维护、保养与故障处理 | 173 |
| 6.6.4 输入交流电抗器 | 146 | 7.4.1 维护和检查时的注意事项 | 173 |
| 6.6.5 无线电噪声滤波器 | 147 | 7.4.2 变频器的日常巡视 | 173 |
| 6.6.6 制动电阻及制动单元 | 148 | 7.4.3 变频器的定期维护与保养 | 174 |
| 6.6.7 直流电抗器 | 149 | 7.4.4 变频器的常见故障及处理 | 175 |
| 6.6.8 输出交流电抗器 | 149 | 本章小结 | 177 |
| 6.7 变频器系统的控制电路 | 149 | 思考与练习 | 178 |
| 6.7.1 变频器控制电路的主要 组成 | 149 | 第 8 章 变频器综合应用 | 179 |
| 6.7.2 正转控制电路 | 150 | 8.1 变频器在恒压供水中的应用 | 179 |
| 6.7.3 正、反转控制 | 151 | 8.1.1 恒压供水技术 | 179 |
| | | 8.1.2 节能原理 | 179 |
| | | 8.1.3 系统结构 | 181 |



| | | | | | |
|-------|-----------------------------|-----|-------------------------|-------------------------------|-----|
| 8.1.4 | 工作原理..... | 182 | 8.7.2 | 刨台往复运动的控制..... | 204 |
| 8.1.5 | PLC 控制系统..... | 182 | 8.8 | 空气压缩机的变频调速及应用..... | 208 |
| 8.1.6 | 注意事项..... | 183 | 8.8.1 | 空气压缩机变频调速机理..... | 208 |
| 8.2 | 变频器在家用空调中的应用..... | 184 | 8.8.2 | 空气压缩机加、卸载供气控制 方式存在的问题..... | 208 |
| 8.2.1 | 家用空调概述..... | 184 | 8.8.3 | 空气压缩机变频调速的 设计..... | 209 |
| 8.2.2 | 变频器解决方案..... | 184 | 8.8.4 | 空气压缩机变频调速的安装 调试..... | 213 |
| 8.3 | 中央空调的变频调速..... | 185 | 8.8.5 | 空气压缩机变频调速后的 效益..... | 214 |
| 8.3.1 | 中央空调的构成..... | 185 | 本章小结..... | 215 | |
| 8.3.2 | 循环水系统的特点..... | 187 | 思考与练习..... | 215 | |
| 8.3.3 | 冷却水系统的变频调速..... | 188 | 第 9 章 项目实训 | 216 | |
| 8.3.4 | 冷冻水系统的变频调速..... | 190 | 项目 1 | 正转连续控制电路..... | 216 |
| 8.4 | 变频器在电梯中的应用..... | 192 | 项目 2 | 正、反转控制电路..... | 225 |
| 8.4.1 | 电梯概述..... | 192 | 项目 3 | 外接两地控制电路..... | 230 |
| 8.4.2 | 616G5 变频器调速系统..... | 192 | 项目 4 | 变频与工频切换的控制电路..... | 237 |
| 8.4.3 | 变频器功率及制动电阻 的选择..... | 193 | 项目 5 | PID 控制电路..... | 240 |
| 8.4.4 | 电梯用变频器的主要功能..... | 194 | 项目 6 | 多段速控制电路..... | 247 |
| 8.4.5 | 变频器的噪声抑制..... | 194 | 项目 7 | 1 控 X 切换电路..... | 254 |
| 8.4.6 | 常见问题..... | 194 | 项目 8 | 输入端子操作控制..... | 261 |
| 8.5 | 变频器在叠压供水中的应用..... | 195 | 项目 9 | 模拟信号操作控制..... | 265 |
| 8.5.1 | 国内、外供水现状..... | 195 | 项目 10 | 多段速频率控制..... | 269 |
| 8.5.2 | 叠压供水系统组成及 原理..... | 196 | 项目 11 | PLC 联机延时控制操作..... | 275 |
| 8.5.3 | 系统的软件设计..... | 197 | 项目 12 | PLC 联机多段速频率控制..... | 281 |
| 8.5.4 | 节能分析..... | 198 | 附录 A..... | 286 | |
| 8.6 | PLC 与变频器连接实现多挡 转速控制..... | 198 | 附录 B..... | 290 | |
| 8.6.1 | 用旋转开关控制..... | 198 | 附录 C..... | 301 | |
| 8.6.2 | 用 PLC 控制多段速运行..... | 199 | 参考文献..... | 310 | |
| 8.7 | 刨台运动的变频调速改造..... | 203 | | | |
| 8.7.1 | 变频调速系统及设计 要点..... | 203 | | | |

第 1 章 绪 论

本章要点

- 变频技术的发展过程。
- 变频技术及变频器发展的趋势。
- 变频器在不同方面的应用。

技能目标

- 会查阅有关变频器的相关文献。
- 能够分析比较不同厂家变频器的优缺点。
- 调查变频器在当地的使用情况。

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。交流传动与控制技术是目前发展最迅速的技术之一，这是与电力电子器件制造技术、变流技术、控制技术、微型计算机和大规模集成电路的发展密切相关的。每当新一代的电力电子器件出现，体积更小、规模更大的新型变频器就会产生，每当出现新的微机控制技术时，功能更全、适应面更广和操作更加方便的一代新型变频器就会出现在市场上。近 20 年来，以功率晶体管 GTR 为逆变器功率元件、8 位微处理器为控制核心、按压频比 u/f 控制原理实现异步电动机调速的变频器，在性能和品种上出现了巨大的技术进步。首先是所用的电力电子器件 GTR 基本上被绝缘双极型晶体管 IGBT 所替代，进而广泛采用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地扩大和提高；其次是 8 位微处理器基本上被 16 位微处理器所代替，进而又采用功能更强的 32 位微处理器或双 CPU，使得变频器的功能从单一的变频调速功能发展为含有逻辑和智能控制的综合功能；最后是在改善压频比控制性能的同时，推出能实现矢量控制和转矩直接控制的变频器，使得变频器不仅能实现调速，还可以进行伺服控制。

1.1 通用变频器的发展过程

自 20 世纪 80 年代初问世以来，通用变频器更新换代了 5 次：第一代是 20 世纪 80 年代初的模拟式通用变频器；第二代是 20 世纪 80 年代中期的数字式通用变频器；第三代是 20 世纪 90 年代初的智能通用变频器；第四代是 20 世纪 90 年代中期的多功能通用变频



器；21 世纪研制上市了第五代集中型通用变频器。通用变频器的发展情况具有 4 大特点。

1.1.1 通用变频器的应用范围不断扩大

通用变频器不仅在工业的各个行业广泛应用，就连家庭也逐渐成为通用变频器的应用市场。正因为通用变频器的应用范围不断扩大，使其产品向以下 3 个方向发展。

- (1) 向无需调整便能得到最佳运行的多功能与高性能变频器方向发展。
- (2) 向通过简单控制就能运行的小型及操作方便的变频器方向发展。
- (3) 向大容量、高启动转矩及具有环境保护功能的变频器方向发展。

1.1.2 通用变频器使用的功率器件不断更新换代

变频技术是建立在电力电子技术基础之上的。在低压交流电动机的传动控制中，应用最多的器件有 GTO、GTR、IGBT 及 IPM(Intelligent Power Module, 智能模块)。IGBT 集 GTR 的低饱和电压特性和 MOSFET 的高频开关特性于一体。后两种器件是目前通用变频器中广泛使用的主流功率器件。由于采用沟道型栅极技术、非穿通技术等方法大幅度降低集电极-射极之间饱和电压的产品问世，使得变频器的性能有了很大的提高。20 世纪 90 年代又出现了一种新型半导体开关器件——集成门极换流晶闸管(Integrated Gate Commutated Thyristor, IGCT)，该器件是 GTO 和 IGBT 结合的产物。总之，电力电子器件正朝着发热少、高载波控制、开关频率高和驱动功率小的方向发展。

IPM 的投入应用大约比 IGBT 晚两年，由于 IPM 包含了 IGBT 芯片及外围驱动和保护电路，甚至还把光耦合器也集成于一体，因此是一种比较好用的集成型功率器件。目前，在模块额定电流 10~600A 范围内，通用变频器均有采用 IPM 的趋势，其优点如下。

- (1) 开关速度快，驱动电流小，控制驱动更为简单。
- (2) 内含电流传感器，可以高速地检测出过电流和短路电流，能对功率芯片给予足够的保护，故障率大大降低。
- (3) 由于在器件内部电源电路和驱动电路的配线设计上做到优化，所以浪涌电压、门极振荡、噪声引起的干扰等问题能有效地得到控制。
- (4) 保护功能较为丰富，如电流保护、电压保护、温度保护一应俱全。
- (5) IPM 的售价已逐渐接近 IGBT，在许多场合中其性价比已超过 IGBT，有很好的经济性。

为此，当 IPM 在工业变频器中被大量采用之后，经济型的 IPM 在近几年也开始在一些民用品，如家用空调变频器、冰箱变频器、洗衣机变频器中得到应用；IPM 通过内部自举电路可单电源供电，并采用了低电感的封装技术，在实现系统小型化、专用化、高性能、低成本方面又迈进了一步。

1.1.3 控制方式不断发展

早期通用变频器大多数采用开环恒压比(U/f)的控制方式,其优点是控制结构简单、成本较低;缺点是系统性能不高,比较适合应用在风机、水泵的调速场合。具体来说,其控制曲线随着负载的变化而变化;转矩响应慢,电机转矩利用率不高,低速时因定子电阻和逆变死区效应的存在而使性能下降、稳定性变差等。

变频器控制方式主要经历了以下三个阶段。

(1) 第一阶段:20世纪80年代初日本学者提出了基本磁通轨迹的电压空间矢量(或称磁通轨迹法)。该方法以三相波形的整体生成效果为前提,以逼近电机气隙的理想圆形旋转磁场轨迹为目的,一次生成二相调制波形。这种方法被称为电压空间矢量控制。如富士公司的FRN5000G5/P5、SANKEN公司的MF系列变频器就是采用这种控制技术。

(2) 第二阶段:矢量控制,也称磁场定向控制。它是20世纪70年代初由西德的F.Blasschke等人首先提出来的,他们以直流电动机和交流电动机相比较的方法阐述了这一原理,由此开创了交流电动机和等效直流电动机控制的先河。它使人们看到,交流电动机尽管控制复杂,但同样可以实现转矩、磁场独立控制的内在本质。矢量控制的基本点是控制转子磁链,以转子磁通定向,然后分解定子电流,使之成为转矩和磁场两个分量,经过坐标变换实现正交或解耦控制。1992年开始,德国西门子公司开发了6SE70通用型系列变频器,通过FC、VC、SC板可以分别实现频率控制、矢量控制、伺服控制,并于1994年将该系列变频器容量扩展至315kW以上。

(3) 第三阶段:1985年,德国鲁尔大学Depenbrock教授首先提出直接转矩控制理论(Direct Torque Control, DTC)。直接转矩控制与矢量控制不同,它不是通过控制电流、磁链等量来间接控制转矩,而是把转矩直接作为被控量来控制。转矩控制的优越性在于:转矩控制是控制定子磁链,在本质上并不需要转速信息,控制上对除定子电阻外的所有电机参数变化鲁棒性良好;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,这种控制被称为无速度传感器直接转矩控制。1995年ABB公司首先推出的ACS600直接转矩控制系列变频器,已达到小于2ms的转矩响应速度,在带PG(速度传感器)时的静态速度精度达0.01%;在不带PG的情况下,即使受到输入电压的变化或负载突变的影响,同样可以达到0.1%的速度控制精度。

1.1.4 PWM 控制技术进一步发展

PWM控制技术一直是变频技术的核心技术之一。从最初采用模拟电路完成三角调制波和参考正弦波比较,产生正弦脉宽调制SPWM信号以控制功率器件的开关开始,到目前采用全数字化方案完成优化的实时在线PWM信号输出,PWM在各种应用场合仍占主



导地位，并一直是人们研究的热点。

由于 PWM 可以同时实现变频变压反抑制谐波的特点，因此在交流传动乃至其他能量交换系统中得到广泛应用。PWM 控制技术大致可以分为三类：正弦 PWM(包括电压、电流的正弦为目标的各种 PWM 方案)、优化 PWM 和随机 PWM。正弦 PWM 已广为人知，飞弦 PWM 因其具有改善输出电压和电流波形、降低电源系统谐波的多重 PWM 技术，在大功率变频器中具有独特的优势。优化 PWM 追求实现电路谐波畸变率(THD)最小、电压利用率最高、效率最优、转矩脉动最小及其他特定优化目标。随机 PWM 的原理是随机改变开关频率，使机电磁噪声近似为限带白噪声(在线性频率坐标中，各频率能量的分布是均匀的)，尽管噪声的总分贝数未变，但以固定开关频率为特征的有色噪声强度大大减弱。对于载波频率必须限制在较低频率的场合，随机 PWM 仍然有其特殊的价值(DTC 控制即为一例)；另一方面，消除机械和电磁噪声的最佳方法不是盲目地提高工作频率，因为随机 PWM 技术提供了一个分析、解决问题的全新思路。目前，采用磁通矢量控制技术的变频器，其调速性能已达到直流电机调速的水平。

1.2 变频器的发展趋势

作为交流电动机变频调速用的高新技术产品，各种国产和进口的通用变频器在国民经济的各个部门得到了广泛的应用。“通用”一词有两个方面的含义：首先是这种变频器可以用来驱动通用型交流电动机，而不一定使用专用变频电动机；其次是通用变频器具有各种可供选择的功能，能适应许多不同性质的负载机械。通用变频器也是相对于专用变频器而言的，专用变频器是专为某些有特殊要求的负载机械而设计制造的。如某些纺织专用变频器，要求其输出频率在额定频率上、下平滑地做周期性变化，变化的周期和幅度均可调(俗称横动功能)。又如电梯专用变频器，要求可以四象限运行；要求频率的上升和下降速率呈 S 形，以使电梯轿厢平稳地加速和减速。专用变频器的价格较贵，大部分负载机械都选用通用变频器。

随着电力电子器件的自关断、模块化，变流电路开关模式的高频化，以及全数字化控制技术和微型计算机(如单片机)的应用，变频器的体积越来越小，性能越来越高，功能不断加强。目前，中小容量(600kVA 以下)的一般用途变频器已经实现了通用化。交流变频器是强、弱电混合，机电一体化的综合性调速装置。它既要进行电能的转换(整流、逆变)，又要进行信息的收集、变换和传输。它不仅解决高电压、大电流有关的技术问题和新型电力电子器件的应用问题，还要解决控制策略和控制理论等问题。目前，变频器主要朝以下 5 个方向发展。

1.2.1 高水平的控制

目前,通用变频器的控制技术中比较典型的有: U/f 恒定控制、转差频率控制、矢量控制和直接转矩控制。除以上 4 种之外,还有基于现代控制理论的滑模变频结构技术、模型参考自适应技术、非线性解耦鲁棒观测器技术、在某些指标意义下的最优控制技术、逆奈奎斯特阵列技术等,基于智能控制的模糊控制、神经网络、专家系统以及各种自优化和自诊断技术等。

1.2.2 主电路逐步向集成化、高频化和高效率发展

集成化的主要措施是把功率元件、保护元件、驱动元件、检测元件进行大规模的集成,变为一个 IPM 的智能电力模块,其体积小、可靠性高、价格低。IPM 可以说是智能化的 IGBT,它把 IGBT 功能元件、驱动电路和保护电路集成在一个芯片上,以前上千个元件组成的各种电路现在用一个芯片即可替代,这样,变频器的失效率就由原来几千个元件的失效率变为一个元件的失效率,而可靠性则提高到原来的几千倍;同时,集成化减少了制造时的大量焊接点,也使可靠性提高,使用寿命延长,目前,用 IPM 制造的变频器也开始批量生产。

高频化主要是开发高性能的 IGBT 产品,提高开关频率。目前,开关频率已提高到 10~15kHz,基本上消除了电动机运行时的噪声。

提高效率的主要办法是减少开关元件的发热损耗,通过降低 IGBT 集电极-发射极间的饱和电压来实现。其次,用可控二极管整流采取各种措施,设法使功率因数增加到 1。现在又开发了一种新型的采用 PWM 控制方式的自换相变流器,并已成功地用作变频器中的网侧变流器,其电路结构与逆变器完全相同,每个桥臂均由一个自关断器件和一个二极管并联组成。其特点是:直流输出电压连续可调,输入电流(网侧电流)波形基本为正弦,功率因数可保持为 1,并且能量可以双向流动。

1.2.3 控制量由模拟量向数字量发展

由变频器供电的调速系统是一个快速系统,在使用数字控制时要求的采样频率较高,通常高于 1kHz,常需要完成复杂的操作控制、数学运算和逻辑判断,所以要求单片机具有较大的存储容量和较强的实时处理能力。全数字控制方式使得信息处理能力大幅度增强。采用模拟控制方式无法实现的复杂控制在今天都已成为现实,使可靠性、可操作性、可维修性功能得以充实。微机和大规模集成电路的引入,对于变频器的通用化起到了决定性的作用。



全数字控制具有以下特点。

(1) 控制精度高。微处理器的精度与字长有关，通用变频器使用 16 位甚至 32 位微处理器作为控制器，其精度不断提高。

(2) 稳定性好。控制信息为数字量，与模拟控制手法不同，它一般不会因温度和环境条件而发生变化。

(3) 可靠性高。由于采用了大规模集成电路，系统的硬件连线较为简单，硬件数量也大大减少，这样故障率就大大降低。

(4) 存储能力强。调速装置大量使用高性能的单片机，系统存储容量增大，存放时间可以不受限制，这一点是模拟系统无法比拟的。利用这一特点，可在存储器中存放大量的数据表格，应用查表法简化计算，提高运算速度。

(5) 适应能力强。调速系统中的硬件逐步向标准化、集成化方向发展，同时，可以在硬件尽可能少的情况下，由软件去完成复杂的控制功能。这样，适当修改软件就可以改变系统的功能，以适应不同的控制对象。

(6) 逻辑运算能力强。容易实现自诊断、故障记录、故障寻找等功能，使变频装置的可靠性、可使用性、可维修性大大提高。

1.2.4 向多功能化和高性能化发展

多功能化和高性能电力电子器件和控制技术的不断进步，使变频器向多功能化和高性能化方向发展。特别是微机的应用，以其简单的硬件机构和丰富的软件功能，为变频器的多功能化和高性能化提供了可靠的保证。

8 位、16 位 CPU 奠定了通用变频器全数字控制的基础。32 位数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)的应用将通用变频器的性能提高了一大步，实现了转矩控制，推出了“无跳闸”功能。目前，新型变频器开始采用新的精简指令计算机(Reduced Instruction Set Computer, RISC)将指令执行时间缩短到纳秒级。据报道，RISC 的运算速度可达 10 亿次/s，相当于巨型计算机的水平。指令计算时间为 1ns 量级，是一般微处理器无法比拟的。有的变频器以门 RISC 为核心的数字控制，可以支持无速度传感器的矢量控制算法、转速估计运算、PID 调节器的在线实时运算。

正是由于全数字控制技术的实现，并且运算速度不断提高，使通用变频器的性能不断提高，功能不断增加。目前出现了一种“多控制方式”的通用变频器，如安川公司的 VS616-G5 变频器就有无 PG 的 u/f 控制、有 PG 的 u/f 控制、无 PG 矢量控制和有 PG 矢量控制 4 种控制方式。通过控制面板，可以设定上述 4 种控制方式中的一种，以满足用户的需要。

1.2.5 向大容量和高压化发展

目前, 高压大容量变频器主要有两种结构: 一是采用升降压变压器的“高一低一高”式变频器, 也称间接高压变频器; 另一种是无输出变压器的“高一高”式变频器, 也称直接高压变频器。后者省掉了输出变压器, 减小了损耗, 提高了效率, 同时也减少了安装空间, 它是大容量电动机调速驱动的发展方向。

随着新型电力电子器件应用技术, 如可关断驱动技术、双 PWM 技术、软开关 PWM 变流技术及现代控制技术、多变量解耦控制技术、自适应技术等的应用, 变频器一定会发展到一个更高、更新的水平。

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。

1.3.1 变频器在节能方面的应用

风机、泵类负载采用变频调速后, 节电效率可达 20%~60%, 这是因为风机、泵类负载的耗电功率基本与转速的 3 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, 电动机的转速基本不变, 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, 在最近几十年来发展非常迅速, 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 $4 \times 10^{10} \text{kW} \cdot \text{h}$ 。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得最多。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, 现在已经成为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。

1.3.2 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 $0.1\% \sim 0.01\%$, 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。

1.3.3 变频器在提高工艺水平和产品质量方面的应用

变频器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, 可以使机械系统简化, 操作和控制更加方便, 有的甚至可以改变原有的工艺规范, 从而改善了整个设备的功能。例如, 纺织和许多行业用到定型机, 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, 送入热风的多少只能用风门来调节。如果风门调节失灵或调节不当就会造成定型机失控, 从而影响产品质量。循环风机高速启动, 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, 解决了产品的质量问題; 此外, 变频器可以很方便地实现风机在低频低速下的启动问题, 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

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得变频器的容量越来越大, 功能越来越强。

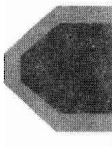
市场需求也是变频器发展的动力, 据测算我国潜在变频调速市场在 $1 \times 10^8 \text{kW}$ 以上。

变频器技术的发展趋势为智能化、专门化、一体化和环保低噪。

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。

思考与练习

1. 什么是变频器?
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. 简述变频器的应用。

