



张燕宾 编著

SPWM 变频调速 应用技术

电气自动化
新技术
丛书

机械工业出版社

电气自动化新技术丛书

SPWM 变频调速应用技术

张燕宾 编著



机械工业出版社

240662
本书以帮助工作在生产第一线的电气工作者们选好用好变频器为宗旨，通俗而实用。

本书详细讲解了变频器中各种功能的含义、决定设定值的依据和方法，以及进行预置设定的具体步骤等。作为预备知识，本书深入浅出地讲解了电力拖动系统的工作要点、异步电动机的主要理论和交-直-交变频器的基本原理。在具体应用方面，本书讲解了变频调速拖动系统的设计要点，并介绍了几种具体应用的实例。

本书可供变频器的使用、维护人员阅读，也可供变频器用户等作为培训教材使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

SPWM变频调速应用技术/张燕宾编著.-北京:机械工业出版社,1997.12

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-05831-3

I. S... II. 张... III. 变频调速-电力传动 IV. TM921.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 15232 号

出 版 人: 马九荣 (北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 孙流芳 版式设计: 王 颖 责任校对: 罗凤书

封面设计: 姚 毅 责任印制: 王国光

北京交通印务实业公司印刷·新华书店北京发行所发行

1997 年 12 月第 1 版·第 1 次印刷

850mm×1168mm¹/₃₂·8.875 印张·218 千字

0 001—5 000 册

定价: 17.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专

院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任委员：陈伯时

副主任委员：喻士林 夏德铃 李永东

委员：（以姓氏笔划为序）

王 炎	王文瑞	王正元
刘宗富	孙 明	孙武贞
孙流芳	过孝瑚	许宏纲
朱稚清	夏德铃	陈伯时
陈敏逊	李永东	李序葆
张 浩	张敬民	周国兴
涂 健	蒋静坪	舒迪前
喻士林	霍勇进	戴先中

《电气自动化新技术丛书》

出版基金资助单位

机械工业部天津电气传动设计研究所

深圳华能电子有限公司

北京电力电子新技术研究开发中心

天津普辰电子工程有限公司

前 言

从1994年10月至1996年2月,我在《电气时代》杂志上陆续发表了14篇连载文章《变频调速应用技术170问》。此后,收到了数百位读者的来信和来电。其中,相当一部分读者都询问“什么时候出书”,更有一位热心的读者给我寄来了中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会编辑《电气自动化新技术丛书》的有关资料和通讯地址。盛情难却,我于是和编委会的喻士林副主任委员取得了联系,并在他的热情支持和鼓励下开始撰写本书。

在进行变频调速的推广应用过程中,我接触了大量的工程技术人员,比较深切地了解到他们的渴望和需求。所以,本书的第一宗旨便是,希望能为工作在生产第一线的同志们提供一点实实在在的参考资料和使用方法。

由于本书的相当篇幅是介绍变频器的各种功能和应用中的一些问题,因此,就内容而言,大多属于对现成的成果进行编撰和解释。但其中,也并非没有笔者自己的思考和发挥。主要有:

(1) 在深入浅出的讲解方式上,笔者是颇下了一点功夫的。例如,对异步电动机的一些分析方法等。

(2) 有些内容是笔者在研制变频器时深有体会而其他书中少有涉及者,如突然停电对逆变管危害的分析、环境温度对逆变过程的影响等。

(3) 也有笔者自己提出来的概念和方法。如关于变频调速时有效转矩线和有效功率线的概念、变频调速应用于恒功率负载时采用两档传动比的方法等。

(4) 笔者自己的实践经验介绍。诸如在实践中,常常会遇到需要紧急处理的问题,例如,用户手头的电位器和说明书中的要

求不符时的处理、外接制动电阻和制动单元的“土法处理”等。

有时候，由于某种原因，对设备的某些方面进行了一些不同于常规的处理，效果不错。再一论证，它居然也是一种好方法。如关于恒压供水的主体方案、关于龙门刨床要求“下垂特性”的处理等等。

此外，也有应部分读者的要求而写的内容，例如关于 PID 控制的通俗说明等。

不消说，由于笔者水平的有限，以及时间的仓促，错误之处以及内容的安排不当之处肯定是不少的。笔者十分诚恳地愿和广大读者展开讨论、交流经验，以求共同提高。

在本书编写过程中，曾得到有关单位和一些同志的热忱支持和帮助，华中理工大学陶绪楠教授仔细审阅了本书，并提出了许多宝贵意见，在此一并表示衷心的感谢。

当读者拿到此书时，我已退休。然而，在变频调速的推广应用方面，我却欲罢而不能了。我架不住读者们的热烈企盼和工程项目的诱惑。

我属牛，我愿在这一方土地上继续地耕耘下去。

作 者

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

前言

符号与缩写字一览表

缩写符号

绪论	1
第1章 预备知识	4
1.1 电力拖动系统的工作要点	4
1.1.1 电力拖动系统的构成	4
1.1.2 电力拖动系统的稳定运行状态	5
1.1.3 电动机和负载的机械特性	5
1.1.4 电力拖动系统的暂态过程	8
1.1.5 电力拖动系统的功率计算与传递	9
1.1.6 电力拖动系统的折算	11
1.2 调速问题综述	11
1.2.1 调速的概念	11
1.2.2 调速的意义	12
1.2.3 调速的主要指标	13
1.3 他励直流电动机概述	14
1.3.1 基本结构和电路	14
1.3.2 他励直流电动机的机械特性	15
1.3.3 他励直流电动机的调速	17
1.4 笼型异步电动机概述	21
1.4.1 基本结构	21
1.4.2 异步电动机的旋转原理	21
1.4.3 异步电动机的调速问题	23
1.5 异步电动机的转子电动势、电流和电磁转矩	24
1.5.1 转子电动势的波形和频率	24

1.5.2 转子电动势的空间分布	26
1.5.3 转子的电流、磁场和电磁转矩	27
1.6 异步电动机的等效变换	30
1.6.1 动/静变换	30
1.6.2 磁/电变换	31
1.7 异步电动机的机械特性	37
1.7.1 电磁转矩公式	37
1.7.2 自然机械特性	37
1.7.3 异步电动机的能量图	39
1.8 异步电动机的制动	39
1.8.1 再生制动	40
1.8.2 直流制动(能耗制动)	42
1.8.3 反接制动	43
第2章 变频调速的基础知识	45
2.1 概述	45
2.1.1 变频调速原理	45
2.1.2 变频器的类别	46
2.1.3 变频器的额定值和频率指标	47
2.2 交-直-交变频器的主电路	49
2.2.1 交-直部分	49
2.2.2 直-交部分	51
2.2.3 制动电阻和制动单元	52
2.3 逆变桥的工作原理	52
2.3.1 单相逆变桥	52
2.3.2 三相逆变桥	53
2.4 变频与变压(VVVF)	55
2.4.1 定子绕组的电动势	55
2.4.2 变频也变压	56
2.5 VVVF的实施	57
2.5.1 两种基本的调制方法	57
2.5.2 正弦波脉宽调制(SPWM)	58
2.5.3 SPWM的电流波形	61
2.6 变频后的机械特性	62

2.6.1	变频后的转矩公式	62
2.6.2	$k_u = k_f < 1$ 时的机械特性	63
2.6.3	$k_f > 1$ 时的机械特性	66
2.7	V/F 控制	68
2.7.1	V/F 控制的概念	68
2.7.2	V/F 控制功能	69
2.7.3	补偿过分的后果	70
2.8	矢量控制概述	72
2.8.1	由直流电动机引发的思考	72
2.8.2	产生旋转磁场的几种方法	73
2.8.3	矢量控制的基本构思	76
2.9	逆变器件简介	78
2.9.1	SCR 和 GTO 晶闸管	78
2.9.2	大功率晶体管 (GTR)	80
2.9.3	MOSFET 和 IGBT	83
第 3 章	变频器的运行功能	85
3.1	工作频率的给定	85
3.1.1	频率的给定方法	85
3.1.2	变频器的外接给定配置	85
3.1.3	外接电位器的选择	86
3.2	外接给定时的给定频率线	87
3.2.1	给定频率线	87
3.2.2	给定频率线的设定方法举例	88
3.2.3	计算举例	90
3.3	与工作频率有关的功能	92
3.3.1	基本频率与最高频率	92
3.3.2	上限频率与下限频率	93
3.3.3	回避频率	93
3.3.4	点动频率	95
3.3.5	载波频率设定	95
3.4	变频调速的升速和起动	95
3.4.1	升速时间	96
3.4.2	升速方式	97

3.4.3 与起动有关的其他功能	99
3.5 变频调速的降速与制动	101
3.5.1 变频调速系统的降速特点	101
3.5.2 降速时间和降速方式	101
3.5.3 直流制动	102
3.5.4 外接制动电阻和制动单元	103
3.5.5 电源再生单元	106
3.6 V/F 控制的设定功能	106
3.6.1 基本 U/f 设定	106
3.6.2 转矩补偿的 U/f 设定	108
3.7 转差补偿、矢量控制、自动电压调整等功能的设定	109
3.7.1 转差补偿功能	109
3.7.2 矢量控制的设定	110
3.7.3 自动电压调整 (AVR) 功能	111
3.8 节能运行功能	112
3.8.1 异步电动机的电流-电压曲线	112
3.8.2 节能运行功能	114
3.8.3 节能运行的设定	115
3.8.4 节能运行的其他方式	115
3.9 往复变速功能和闭环控制功能	116
3.9.1 往复变速功能	116
3.9.2 闭环控制功能	117
3.10 变频器的外接控制功能	118
3.10.1 外接控制的电路结构	118
3.10.2 外接控制端的配置和工作特点	120
3.10.3 多档转速控制	121
3.10.4 程序控制	123
3.10.5 其他功能控制端	123
3.11 外接输出信号端	124
3.11.1 外接输出信号的项目	124
3.11.2 外接输出信号端的配置	126
第 4 章 变频器的保护、显示和预置	127
4.1 过电流保护功能	127

4.1.1 过电流的原因	127
4.1.2 变频器对过电流的处理	128
4.2 过载保护功能	129
4.2.1 电动机的允许持续电流和工作频率的关系	130
4.2.2 电子热保护器的反时限特性	130
4.3 电压保护功能	132
4.3.1 过电压保护	132
4.3.2 欠电压保护	133
4.4 瞬时停电的处理	134
4.4.1 突然停电对变频器的影响及对策	134
4.4.2 对变频器瞬时停电的处理	136
4.5 其他保护功能	137
4.5.1 过热与接地保护	137
4.5.2 变频器内部的工作错误保护	138
4.5.3 外接保护信号的输入	138
4.6 故障的处理	138
4.6.1 故障的处理过程	138
4.6.2 再试功能	140
4.7 变频器的显示功能	140
4.7.1 发光二极管显示	140
4.7.2 数据显示屏	140
4.7.3 液晶显示屏	141
4.7.4 外接仪表显示	143
4.8 变频器的功能预置	144
4.8.1 概述	144
4.8.2 程序设定要点	146
4.8.3 变频器的键盘配置	148
4.9 常用变频器的键盘配置和预置流程举例	149
4.9.1 佳灵公司 JP6C-T9/J9 系列变频器	149
4.9.2 富士公司 FVR-E9S 系列变频器	150
4.9.3 三菱公司 FR-A240 系列变频器	151
4.9.4 明电舍公司 VT210S 系列变频器	153
4.9.5 日立公司 J300 系列变频器	154

4.9.6	ABB 公司 SAMI-G3 系列变频器	155
4.9.7	德国赛普公司 VC-400 系列变频器	158
4.9.8	安川公司 VS616G5 系列变频器	160
4.9.9	美国金鹰科技有限公司 VSD-2000 系列变频器	162
4.9.10	法国施耐德公司 ALTIVAR66 系列变频器	164
4.9.11	说明	166
第 5 章	变频调速驱动系统的设计	167
5.1	负载的分类	167
5.1.1	按机械特性分类	167
5.1.2	按发热情况分类	168
5.2	$f_x \leq f_N$ 时, 电动机的带负载能力	170
5.2.1	电动机在变频时的有效转矩和有效功率	170
5.2.2	$f_x \leq f_N$ 时的带负载能力	171
5.3	$f_x > f_N$ 时的带负载能力	174
5.3.1	按发热原则决定带负载能力	174
5.3.2	按过载能力决定带负载能力	174
5.4	关于带负载能力的讨论	176
5.4.1	实际应用举例	176
5.4.2	关于 Y 联结电动机改成 Δ 联结的讨论	176
5.4.3	普通电动机在 $k_f > 1$ 时的运行	177
5.5	变频调速拖动系统设计概述	178
5.5.1	设计任务和已知条件	178
5.5.2	电动机的选择	179
5.5.3	变频器的选择	179
5.5.4	确定传动比	180
5.6	恒转矩负载的变频调速	181
5.6.1	工作频率的范围	181
5.6.2	电动机容量的确定	182
5.6.3	变频器的选择	183
5.6.4	计算实例	184
5.7	恒功率负载的变频调速	185
5.7.1	基本分析	185
5.7.2	两档传动比的变频拖动系统	186

5.7.3 计算实例	188
5.8 平方律负载的变频调速	190
5.8.1 基本分析	190
5.8.2 风机和泵类的调速传动	191
5.8.3 节能计算实例	192
5.8.4 变频调速用于泵水管道	194
5.9 特殊电动机的变频调速	195
5.9.1 双速电动机的变频调速	195
5.9.2 齿轮减速电动机的变频调速	197
5.9.3 绕线转子异步电动机的变频调速	198
5.9.4 电磁制动电动机的变频调速	198
5.9.5 一台变频器带多台电动机	199
第6章 变频器的安装与使用	201
6.1 变频器的安装	201
6.1.1 变频器对安装环境的要求	201
6.1.2 变频器的散热问题概述	201
6.1.3 变频器的发热与散热	202
6.1.4 安装变频器的具体方法和要求	202
6.2 变频器的接线	204
6.2.1 主电路的接线	204
6.2.2 控制电路的接线	205
6.2.3 变频器的接地	207
6.3 变频器的功率因数及其改善	207
6.3.1 变频器的输入电流	207
6.3.2 变频器输入电路的功率因数	208
6.3.3 改善功率因数的方法	209
6.4 变频器的抗干扰	211
6.4.1 外界对变频器的干扰	211
6.4.2 变频器的干扰和传播	211
6.4.3 变频器的抗干扰措施	212
6.5 变频器的外围选配件	213
6.5.1 常规配件	213
6.5.2 专用配件	214

6.6 变频器的测量	217
6.6.1 高次谐波对各类测量仪表的影响	217
6.6.2 测量变频器电路时仪表类型的选择	219
6.6.3 绝缘电阻的测量	220
6.7 变频调速系统的调试	220
6.7.1 变频器的通电和预置	220
6.7.2 电动机的空载试验	221
6.7.3 拖动系统的启动和停机	221
6.7.4 拖动系统的负载试验	222
6.8 故障原因分析	222
6.8.1 过电流跳闸的原因分析	222
6.8.2 电压跳闸的原因分析	223
6.8.3 电动机不转的原因分析	223
第7章 应用实例	225
7.1 供水和供油的恒压控制	225
7.1.1 恒压供水和供油的意义	225
7.1.2 关于恒压供水主体方案的讨论	226
7.1.3 采用PID调节的控制方案	227
7.1.4 不采用PID调节的控制方案	232
7.1.5 变频系统设计要点	233
7.2 带式输送机的变频调速	233
7.2.1 带式输送机的负载性质和主要类别	233
7.2.2 带式输送机的变频调速要点	234
7.2.3 向下输送时的拖动特点	236
7.2.4 间歇输送的拖动要点	237
7.3 龙门刨床刨台拖动系统的变频调速	238
7.3.1 刨台的调速特点	238
7.3.2 原选直流电动机调速系统的主要特点	239
7.3.3 采用异步电动机变频调速的讨论	240
7.3.4 方案举例	241
7.3.5 关于下垂特性的讨论	243
7.3.6 刨台往复运动的控制	244
7.4 印染机械的同步控制(以轧染机为例)	248