

高压大功率 交流变频调速技术

张 皓 续明进 杨 梅 编著

电气自动化
新技术丛书



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TM921.51
8

电气自动化新技术丛书

高压大功率交流 变频调速技术

张 皓 续明进 杨 梅 编著

机械工业出版社

高压大功率交流变频调速技术是 20 世纪 90 年代发展起来的新技术,目前正在迅猛发展中。

本书作者基于多年来从事这方面的教学、科研与现场实践工作的体会,详细介绍了高压变频常用电力电子器件,常用高压变频调速系统的基本原理、控制系统和应用性能,以及高压变频调速系统的常用 PWM 算法、控制策略、技术方案、产品设计和应用等内容。本书理论联系实际,条理清楚,通俗易懂。

本书可以作为从事电气传动自动化技术的工程技术人员及高等学校师生的参考书,也可作为相关培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

高压大功率交流变频调速技术/张皓,续明进,杨梅编著. —北京:机械工业出版社,2006.7

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-19218-4

I. 高... II. ①张...②续...③杨... III. 大功率—交流—变频调速 IV. TM921.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 052698 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:孙流芳 版式设计:霍永明 责任校对:申春香
封面设计:姚毅 责任印制:洪汉军
北京瑞德印刷有限公司印刷
2006 年 8 月第 1 版第 1 次印刷
140mm × 203mm · 14.25 印张 · 378 千字
0001—4000 册
定价:30.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294
编辑热线电话(010)88379768
封面无防伪标均为盗版

电气自动化工具书

已出版目录

- 电工最新基础标准应用手册（第2版） 杨振宽主编
- 电力电子设备设计和应用手册（第2版） 王兆安、张明勋主编
- 电力电子设备用器件与集成电路应用指南 李宏编著
 - 第1册 电力半导体器件及其驱动集成电路
 - 第2册 控制用集成电路
 - 第3册 传感、保护用和功率集成电路
 - 第4册 其他配套元器件
- 可编程控制器选用手册 袁任光编著
- 楼宇自控系统电气运行维修手册 孟宪章、罗晓梅主编
- 变频器应用手册（第2版） 吴忠智、吴加林编著
- 调速用变频器及配套设备选用指南 吴忠智、黄立培、吴加林编著
- 电力半导体模块选用和代换手册 杜柏田编
- 电力电子技术手册（美）Muhammad H.Rashid 主编
- 现场总线产品手册 蔡忠勇主编
- 开关电源手册（原书第2版） （日）原田耕介主编
- 西门子工业网络通信指南 崔坚主编
- 电气传动自动化技术手册（第2版） 天津电气传动设计研究所编著
- 电气设备机械结构设计手册 于庆祯、李锋编

《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

第4届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任：王 炎

副主任：王兆安 王志良 赵相宾 牛新国

委员：王正元 王永骥 王兆安 王 旭
王志良 王 炎 牛新国 尹力明
刘宗富 许宏纲 孙流芳 阮 毅
李永东 李崇坚 陈伯时 陈敏逊
陈维均 周国兴 赵光宙 赵 杰
赵相宾 张 浩 张敬明 郑颖楠
涂 健 徐殿国 黄席樾 彭鸿才
霍勇进 戴先中

秘 书：刘凤英

第4届《电气自动化新技术丛书》 编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来，在学会领导和广大作者、读者的支持下，至今已出版发行丛书38种33万余册，受到广大读者的欢迎，对促进我国电气传动自动化新技术的发展和传播起到了很大作用。

许多读者来信，表示这套丛书对他们的工作帮助很大，希望我们再接再厉，不断推出介绍电气传动自动化新技术的丛书。因此，本届编委会决定选择一些大家所关心的新选题，继续组织编写出版，同时对受读者欢迎的已出版的丛书，根据技术的发展，我们将组织一些作者进行修订再版，以满足广大读者的需要。

我们诚恳地希望广大读者来函，提出您的宝贵意见和建议，以使本丛书搞得更好。

在本丛书出版期间，为加快与支持丛书出版，成立了丛书出版基金，得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位的支持，在此我们对所有资助单位再次表示感谢。

第4届《电气自动化新
技术丛书》编辑委员会
2002年10月12日

前 言

国内的高压变频调速技术自诞生之日起，走的就是立足国产、自主创新、社会各界（技术、产业、资本、政府、用户）通力合作发展的道路。国产高压变频器 10 年的发展历程凝聚了业界广大科技人员大量的心血。客观地讲，国产高压变频器在产品性能、功率等级、结构设计等许多方面与一些发达国家的产品相比还有一定的差距，但国产设备在一些关键性的技术指标，如输入输出谐波、控制算法等方面还是领先的。

国产高压变频器的这些差距是由于国内产业基础不足和社会资本不足以及融资渠道不畅通等客观原因造成的。几年来，在高压变频器市场上锐意开拓进取的业界企业大都是在一穷二白的零初始条件下开始的，没有长期的技术积累，没有深厚的产业基础，没有充裕的资本支持，甚至除了股东的自有资本投入外，没有任何切实可行的融资渠道。国内高压变频产业发展到今天的可喜局面，更多的是靠业界的广大技术人员、管理人员、应用推广人员以及一些有志于此的各界人士共同努力的结果，来之不易。

本书作者有幸经历了国内高压变频产业从无到有、从小到大、从弱到强的发展历程，并借本书对高压变频调速技术当前的发展进行一次比较全面的归纳和系统的总结。全书共分 12 章，第 1 章简单介绍了高压变频的分类、发展过程以及发展中面临的问题。第 2 章主要介绍了高压变频器中常用的一些电力电子器件的原理及驱动、串并联技术。第 3 章重点介绍高压交-交变频调速技术的原理及设计。第 4 章主要介绍了电流源型高压变频调速技术的原理以及产品设计中的一些相关问题。第 5 章重点介绍了三电平电压源型高压变频调速系统的工作原理、三电平空间电压

矢量算法、三电平 PWM 整流技术以及三电平电压源型高压变频器的实现方法。第 6 章重点介绍了当前比较普遍采用的功率单元串联式多电平电压源型高压变频器的基本原理、输入多重化技术、产品设计中的相关技术问题以及产品实现方案等，并对功率单元串联式多电平高压变频器的一些性能进行了分析。第 7 章介绍了当前高压变频调速技术中常用的 PWM 控制算法，如调制波变换技术、载波变换技术等。第 8 章介绍了高压变频调速中的标量控制、无速度传感器矢量控制、直接转矩控制等常用的控制策略的基本原理及具体实现方法。第 9 章介绍了高压变频调速中其他一些可行的技术方案。第 10 章和第 11 章结合作者多年的从业经验介绍了高压变频调速器产品设计中的一些具体实现方案、产品应用中的一些基本知识。第 12 章结合一些高压变频调速的具体技术方案介绍了高压变频调速的仿真方法，并给出了一些实际例子。

本书的第 1、3~9 章由张皓编写，第 2、10、11 章由续明进编写，第 12 章由杨梅编写，全书由张皓统稿。征得吴加林先生和丁振荣先生同意，本书第 9 章的编写中参考了他们的一些研究资料，马丽娜完成了本书部分内容的修订、文字编排和绘图等工作。

本书的编写中参阅了近些年国内外业界大量的研究成果，在此一并表示感谢。感谢 10 年来对作者给予过帮助的前辈和同仁们，感谢这些年来与笔者一同在高压变频领域奋斗的同事们。特别感谢机械工业出版社的孙流芳老师，孙老师以其深厚的技术功底在本书编写中从选题、内容安排以及一些深入的技术问题等方面给予作者极大的指导和帮助，让作者得以对高压变频调速技术进行了一次系统的梳理和深入的研究学习。

本书的编写得到了北京市委组织部北京市优秀人才培养资助项目和北京市教委信号与信息处理重点建设学科项目以及北京市教委面上科研项目的资助。

由于作者水平有限，同时高压变频调速领域的技术发展也已

越来越深入，许多技术问题本书没有涉及，本书内容中还有许多不足之处，恳请各位前辈和同仁们批评指正。作者信箱：howzh@bigc.edu.cn。

作者

2006年4月于北京

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

第4届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会的话

前言

第1章 绪论	1
1.1 高压大功率交流变频调速技术的发展	1
1.2 高压大功率交流变频调速系统的基本类型	3
1.3 高压大功率交流变频调速系统的应用	6
1.4 高压大功率交流变频调速系统发展中面临的问题	7
第2章 高压变频用电力电子器件	10
2.1 概述	10
2.1.1 电力电子器件是影响高压变频器发展的重要因素	10
2.1.2 高压变频器常用的电力电子器件及其分类	10
2.1.3 本章主要探讨的问题	11
2.2 电力二极管	12
2.2.1 PN结电力二极管	12
2.2.2 快恢复二极管	13
2.3 晶闸管	15
2.3.1 晶闸管的基本结构与工作原理	15
2.3.2 晶闸管的基本特性与参数	17
2.4 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	21
2.4.1 IGBT的基本结构与工作原理	21
2.4.2 IGBT基本特性	23
2.4.3 IGBT特性参数表	26
2.4.4 IGBT驱动电路	28
2.5 集成门极换流晶闸管 (IGCT)	47
2.5.1 IGCT工作原理	48
2.5.2 IGCT基本特性	49

2.5.3	IGCT 特性参数	51
2.5.4	IGCT 的门极驱动技术	52
2.6	注入增强栅晶体管 (IEGT)	53
2.6.1	IEGT 的基本结构与工作原理	53
2.6.2	IEGT 的基本特性	54
2.6.3	IEGT 的最大额定值与主要技术参数	55
2.7	电力电子器件的串并联设计	57
2.7.1	电力电子器件的串联技术	57
2.7.2	电力电子器件的并联技术	60
第 3 章	高压交-交变频调速系统	64
3.1	三相输出交-交变频器的基本原理	64
3.1.1	三相-单相交-交变频基本原理	65
3.1.2	有环流模式与无环流模式	67
3.1.3	交-交变频器的控制	70
3.1.4	三相-三相桥式交-交变频基本原理	71
3.1.5	三相-三相桥式交-交变频器的输入输出谐波 及输入功率因数	72
3.1.6	三相-三相桥式交-交变频器的谐波及无功功率的抑制	75
3.2	矩阵式交-交变频器	77
3.3	三相高压交-交变频调速技术及应用	79
3.3.1	电力电子器件参数选择及器件串联	79
3.3.2	一种实际的高压交-交变频调速系统	81
第 4 章	电流源型高压变频调速系统	82
4.1	电流源型高压变频器的基本原理	82
4.1.1	晶闸管方波输出电流源型变频器的基本原理	82
4.1.2	晶闸管换相过程	86
4.2	PWM 式电流源型变频器	89
4.2.1	PWM 式电流源型变频器的基本原理	89
4.2.2	逆变桥的换相过程	92
4.3	电流源型变频器的谐波抑制	93
4.3.1	电流源型变频器的输入串联多重化	93
4.3.2	电流源型变频器的输出多重化	95
4.4	电流源型高压变频器的产品设计	97

第 5 章 三电平电压源型高压变频调速系统	99
5.1 三电平电压源型高压变频调速技术的基本原理	99
5.1.1 二极管钳位三电平电路的基本原理	99
5.1.2 二极管钳位三电平电路的输出电压及负载电压	105
5.1.3 二极管钳位三电平电路的软开关技术	109
5.1.4 其他钳位方式三电平电路	112
5.2 三电平空间电压矢量控制算法	116
5.2.1 三电平空间电压矢量的合成	116
5.2.2 三电平 SVPWM 的控制算法	120
5.2.3 三电平 SVPWM 控制中的一些问题	124
5.3 谐波和功率因数	135
5.3.1 谐波与功率因数简介	135
5.3.2 三电平的输入输出谐波和输入功率因数	139
5.4 三电平 PWM 可控整流及电动机的四象限运行	141
5.4.1 电动机的四象限运行及负载能量回馈	141
5.4.2 PWM 可控整流的基本原理	144
5.4.3 三电平 PWM 可控整流的原理及 SVPWM 控制算法	147
5.5 三电平产品的几种实现方案	153
第 6 章 功率单元串联式多电平电压源型高压变频调 速系统	160
6.1 H 桥功率单元串联式多电平的基本原理	160
6.2 功率单元串联式多电平的输入多重化技术	164
6.2.1 变压器延边三角形移相技术	165
6.2.2 移相多重化整流技术	171
6.2.3 本节小结	180
6.3 功率单元串联式多电平的相关技术	181
6.3.1 产品的可靠性	181
6.3.2 变频器的制动	186
6.3.3 飞速启动	189
6.4 功率单元串联式多电平系统的输出性能分析	190
6.4.1 输出谐波	190
6.4.2 转矩脉动	191
6.4.3 du/dt	193

6.4.4	轴电压和轴电流	194
6.4.5	输出导线长距离传输问题	195
6.5	功率单元串联式多电平高压变频调速系统的基本构成	196
6.5.1	输入部分	197
6.5.2	功率变换部分	197
6.5.3	检测与保护部分	197
6.5.4	控制部分	198
6.5.5	PLC	198
6.6	其他派生的功率单元串联式多电平技术方案	199
6.6.1	功率单元采用多电平结构的技术方案	199
6.6.2	非对称结构功率单元串联式多电平变频调速系统	200
6.6.3	混联式多电平技术方案	203
第7章	高压变频器中常用 PWM 算法	206
7.1	PWM 技术概述	206
7.1.1	PWM 的基本概念	206
7.1.2	PWM 的类型	207
7.2	调制波变换技术	216
7.2.1	提高电压利用率的调制波变换技术	218
7.2.2	减小开关损耗的调制波变换技术	221
7.3	调制波分解技术	224
7.3.1	调制波等比例分配	225
7.3.2	调制波纵向分割方法	231
7.4	波形连续变换技术	235
7.5	空间电压矢量 PWM	244
7.5.1	三相异步电动机在三相对称正弦波电压供电时的特性	244
7.5.2	空间电压矢量 PWM 方法	247
7.5.3	SVPWM 的特性分析	253
第8章	高压变频的常用控制策略	263
8.1	U/f 控制	263
8.1.1	异步电动机的工作原理及等效电路	263
8.1.2	维持 $U_1/f_1 = \text{常数}$ 的简单开环控制	264
8.2	无速度传感器矢量控制	266
8.2.1	基本原理	267

8.2.2	无速度传感器矢量控制总体方案	269
8.2.3	有速度传感器矢量控制方案	279
8.3	直接转矩控制	281
8.3.1	直接转矩控制系统的原理	282
8.3.2	直接转矩控制系统的结构	286
第9章	高压变频调速的其他技术方案	290
9.1	高-低-高式及高-低-低式变频调速系统	290
9.2	IGBT直接串联式两电平电压源型高压变频调速系统	293
9.3	变压器耦合功率单元串联式高压变频拓扑	295
9.4	具有多个分支绕组的交流电动机变频调速系统	298
9.5	绕线转子异步电动机双馈调速及串级调速技术	301
第10章	高压大功率交流变频调速系统的产品设计	308
10.1	主电路的设计	308
10.1.1	主电路拓扑结构参数的计算	308
10.1.2	功率单元中电力电子器件的参数计算与选型	310
10.2	检测与保护电路	313
10.3	缓冲电路	315
10.3.1	RC-VD缓冲电路的分析与计算	316
10.3.2	逆变电路的常用缓冲电路	319
10.3.3	大功率叠层功率母线	321
10.4	电磁兼容性设计	322
10.4.1	高压变频器输入侧的谐波问题	323
10.4.2	高压变频器输出侧的谐波问题	327
10.4.3	高压变频器的抗干扰问题	331
10.5	散热与通风设计	331
10.5.1	电力电子器件的散热设计	331
10.5.2	功率单元的散热冷却设计	334
10.5.3	整机的散热与通风设计	337
10.6	可靠性	340
10.6.1	可靠性指标	341
10.6.2	高压变频器的可靠性模型	342
10.6.3	提高可靠性的措施	345
第11章	高压大功率交流调速系统的接口及应用	349

11.1	DCS 与 PLC	349
11.1.1	DCS	349
11.1.2	PLC	351
11.2	现场总线技术	352
11.2.1	现场总线的概念	352
11.2.2	现场总线技术特点	353
11.2.3	现场总线通信协议特点	354
11.2.4	典型现场总线技术与产品	355
11.2.5	现场总线技术的应用	357
11.3	高压变频器的接口设计	358
11.4	泵与风机的调速运行原理	360
11.4.1	泵与风机的节电基础	361
11.4.2	泵与风机的运行调节	365
11.4.3	泵或风机的联合运行	367
11.5	大功率电动机调速方式	371
11.5.1	交流调速方法	371
11.5.2	各种交流调速方法的对比	373
11.6	高压变频器在电厂中的应用	375
11.6.1	高压变频器在电厂送引风机变频调速改造中的应用	376
11.6.2	高压变频器在电厂循环水泵变频调速改造中的应用	378
11.7	高压变频器在冶金企业中的应用	378
11.8	高压变频器在煤矿通风机变频调速中的应用	382
11.9	高压变频器在供水领域中的应用	383
11.10	高压变频器在石化行业中的应用	386
11.10.1	ACSI1000 变频器的主要特点	386
11.10.2	系统改造方案	386
11.10.3	系统运行效果	388
11.11	高压变频器在电力牵引中的应用	388
11.12	高压变频器在风洞中的应用	389
第 12 章	高压变频调速系统的计算机仿真	393
12.1	MATLAB 仿真环境基本介绍	394
12.1.1	MATLAB 软件介绍	394
12.1.2	Simulink 工具箱介绍	395

12.1.3	电力系统模块库 (PSB) 简介	396
12.1.4	Subsystem 的建立和 Mask 功能	397
12.1.5	S 函数介绍	399
12.2	高压变频调速系统主电路的建模与仿真	399
12.2.1	三电平电压源型高压变频调速系统的建模与仿真	399
12.2.2	Simulink 仿真的运行	400
12.2.3	功率单元串联式多电平高压变频调速系统的建模与 仿真	406
12.3	高压变频调速系统多重化整流仿真研究	412
12.3.1	48 脉波多重化整流仿真	412
12.3.2	144 脉波多重化整流仿真	416
12.4	高压变频调速系统常用控制策略仿真	419
12.4.1	无速度传感器矢量控制系统仿真	419
12.4.2	直接转矩控制系统仿真	423
	参考文献	431