

第3版

大功率 交-交变频调速及 矢量控制技术

马小亮 著

电气自动化
新技术丛书



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电气自动化新技术丛书

大功率交-交变频调速及 矢量控制技术

第3版

马小亮 著



机械工业出版社

大功率交-交变频调速和矢量控制技术是 20 世纪 70~80 年代发展起来的新技术,正在逐步取代传统的大功率直流调速。

本书基于作者从事这方面工作的体会,详细介绍了这两项技术的原理、主电路和控制电路,以及它们的设计计算方法。在叙述原理时,力求从物理概念出发,避免过多的抽象数学推导。

第 2 版修订时,新增加 12 脉波、有环流、三角形交-交变频器及同步电动机按磁通定向矢量控制系统的动态过程等内容。

这次修订时,又新增加数字控制系统和 CC/CSI 混合变频器等内容。

本书可作为从事电气传动自动化技术的工程技术人员及高等院校师生的参考书,也可作为有关培训班的教材。

图书在版编目(CIP)数据

大功率交-交变频调速及矢量控制技术/马小亮著. —3 版. —北京:机械工业出版社,2003. 10
(电气自动化新技术丛书)
ISBN 7-111-12922-9

I. 大... II. 马... III. ①交交流电传动—变频调速
②交流电机—矢量—控制 IV. TM921.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 073640 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:冉晓华 责任校对:陈延翔
封面设计:姚毅 责任印制:闫焱

北京中加印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 1 月第 3 版第 1 次印刷
850mm×1168mm $\frac{1}{32}$ ·7.875 印张·210 千字
13 001—17 000 册
定价:16.00 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) 68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

《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

第3版前言

在广大读者的支持下,本书已出版了两版,借此第3版出版机会,再次表示感谢。在前两版中,介绍的是交-交变频和矢量控制的原理及模拟控制系统。随着技术发展,数字控制系统已取代了原有的模拟控制系统。两种系统的原理及框图基本相同,只是实现手段不同,所以在第3版中仍保留了原模拟控制系统部分的介绍,以利于读者理解系统及各环节的原理,同时为适应技术发展,新增加一章,介绍数字控制系统。在这一章中,主要讨论从模拟控制系统到数字控制系统有哪些变化及需要注意的问题,最后介绍一个数字控制系统实例与模拟控制系统的实例相对照,这一章定为第8章,将第2版中的原第8章改为第9章,介绍其他类型的交-交变频器,在这一章中,保留了第2版中的三种变频器,并新增加一种CC/CSI混合变频器。

在本版改写中,得到天津电气传动研究所伍丰林、西门子(中国)有限公司杨树春及天津大学魏学森等人的许多支持和帮助,在此一并表示感谢。

作 者

2003年6月

第 1 版前言

大功率交-交变频调速及矢量控制技术是本世纪 70~80 年代发展起来的新技术,正逐步取代传统的大功率直流调速。我国已引进多套大功率交-交变频调速装置,同时也自行开发这类装置,预计 90 年代会有较大的发展。

缺少全面介绍该技术的参考书籍和培训教材是推广应用该项技术的障碍之一。许多交流调速的教科书都涉及这两项技术,但过于简单,距实际应用太远;或过于偏重理论,抽象的数学推导太多,使初学者不得要领。本书基于作者从事这方面工作的体会,详细地介绍了这两项技术的原理、主电路和控制电路,以及它们的设计计算方法,力求从物理概念出发,避免用过多的抽象数学推导。

本书第 1 章概述交-交变频调速的特点、应用范围、使用的电机及发展历史。第 2、3 章介绍交-交变频器的原理、对电网的影响、主电路设计及控制方法。第 4~7 章介绍矢量控制原理、同步电动机和异步电动机的矢量控制系统及调节器计算方法。书中所用的素材部分来自公开发行的书刊和学术会议文集,请参阅书后的参考文献;另一部分来自外国公司的技术资料 and 培训教材,无法列入参考文献,请读者谅解。

本书的对象是高等院校电气自动化类的教师、研究生和高年级学生;该领域中的研究设计人员、技术人员及技术工人。本书既可作为参考书,也可作为技术培训的教材。阅读本书需有晶闸管可逆直流传动的基础知识。

初稿完成后,蒙上海大学陈伯时教授主审,提出了许多宝贵的修改和补充意见,特此表示感谢。在本书的选题、编写、审稿和出版过程中,中国自动化学会电气自动化专业委员会、中国电

工技术学会电控系统与装置专业委员会、机械工业出版社以及天津电气传动设计研究所的领导和同事们给予了许多支持和帮助，没有这些支持和帮助，本书是不可能面世的，作者对此深表谢意。

由于水平所限，书中定有不少谬误和欠妥之处，衷心希望读者批评指正。

作 者

1991 年 4 月

第 2 版前言

本书自 1991 年出版后，得到许多读者的支持，他们提出了许多宝贵的意见和建议，借此再版机会首先表示感谢。参照这些意见和建议，再版时，在第 4 章最后增加了一节关于同步电动机负载变化时励磁绕组暂态分量及阻尼绕组作用的讨论，在本书正文最后增加了一章（第 8 章）介绍 12 脉波交-交变频器、具有无功自动控制（SVC）功能的有环流交-交变频器和三角形交-交变频器，另外还在其他章节中做了局部修改。

作 者

1996 年 1 月

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

第3版前言

第1版前言

第2版前言

第1章 概述	1
1.1 交流调速传动和直流调速传动	1
1.2 交-交变频调速传动的应用范围	5
1.3 交-交变频调速传动用电动机	8
1.4 交-交变频调速传动发展概况	10
第2章 交-交变频器基础	12
2.1 单相输出交-交变频器原理	12
2.2 三相输出交-交变频器原理	13
2.3 交-交变频器输出频率上限	17
2.4 交-交变频器电网侧输入功率因数	20
2.4.1 功率因数定义	20
2.4.2 可控整流装置的功率因数	20
2.4.3 单相输出交-交变频器的输入功率因数	21
2.4.4 三相输出交-交变频器的输入功率因数	22
2.4.5 接有容性负载的交-交变频器的输入功率因数	26
2.5 交-交变频器电网侧输入电流谐波	26
2.5.1 直流传动用可控整流器的输入电流谐波	26
2.5.2 单相输出交-交变频器的输入电流谐波	27
2.5.3 三相输出交-交变频器的输入电流谐波	28
2.6 交-交变频器的无功补偿及谐波吸收	30
2.6.1 补偿电容器	30
2.6.2 无源谐波吸收及静补装置	32
2.6.3 有源谐波吸收装置	34

2.7 交-交变频器主回路参数计算	36
2.7.1 整流变压器计算	36
2.7.2 晶闸管电压、电流计算	38
第3章 交-变频器的控制	42
3.1 电压控制型交-变频器的控制	42
3.1.1 余弦交点法	42
3.1.2 错位无环流法	43
3.2 电流控制型单相输出交-变频器的控制	45
3.2.1 电流调节及电压前馈补偿	45
3.2.2 电流断续补偿	47
3.2.3 $\alpha_{\max}$ 及 $\alpha_{\min}$ 的限制	49
3.2.4 零电流检测	51
3.2.5 无环流换向逻辑	52
3.3 电流控制型三相输出交-变频器的控制	55
3.3.1 三相电流调节	55
3.3.2 交流偏置	57
第4章 交流电动机矢量控制基础	59
4.1 电动机统一控制理论	59
4.1.1 调速的关键是转矩控制	59
4.1.2 统一的电动机转矩公式	60
4.2 直流电动机的控制	62
4.3 交流电动机矢量控制基本概念	63
4.4 交流电动机的坐标系及符号规定	65
4.4.1 交流电动机的坐标系	65
4.4.2 符号规定	66
4.5 交流电动机的空间矢量概念	67
4.6 坐标变换及矢量分析	72
4.6.1 坐标变换	72
4.6.2 矢量分析器 (VA)	75
4.7 永磁同步电动机按转子位置定向的矢量控制原理	76
4.8 普通同步电动机按磁通定向的矢量控制原理	78
4.9 异步电动机按磁通定向的矢量控制原理	84
4.10 在矢量控制系统中电动机的加减速和正反转	92

4.11 普通同步电动机按磁通定向矢量控制系统的动态过程	94
4.11.1 励磁绕组的暂态效应	94
4.11.2 阻尼绕组的作用	96
第5章 普通同步电动机按磁通定向的矢量控制系统	97
5.1 变频器的电流控制系统	97
5.2 同步电动机的电流模型	100
5.2.1 定子、励磁(转子)、磁化及阻尼电流矢量	100
5.2.2 电流模型	102
5.3 同步电动机的电压模型	105
5.4 磁链调节及弱磁控制	110
5.5 同步电动机的转子位置测量	112
5.6 同步电动机功率因数控制	115
5.7 电动机速度控制	118
5.8 同步电动机矢量控制系统框图	122
第6章 异步电动机按磁通定向的矢量控制系统	123
6.1 异步电动机与同步电动机的矢量控制系统的比较	123
6.2 异步电动机按磁通定向的矢量控制系统	125
6.2.1 磁链开环的异步电动机矢量控制系统	125
6.2.2 磁链闭环的异步电动机矢量控制系统	125
6.2.3 磁链开环和闭环复合的异步电动机矢量控制系统	127
6.3 无测速发电机和编码器的简易异步电动机矢量控制系统	131
第7章 电动机工作点及调节器参数计算	135
7.1 变量的测量值、相对值和模型值	135
7.2 电动机工作点计算	138
7.2.1 同步电动机工作点计算	138
7.2.2 异步电动机工作点计算	141
7.3 调节器参数计算	144
7.3.1 交流电流调节器计算	145
7.3.2 直流电流调节器计算	147
7.3.3 转子励磁电流调节器计算	148
7.3.4 磁链调节器计算	149
7.3.5 速度调节器计算	153
第8章 交-交变频调速数字矢量控制系统	155

8.1 数字控制的共性问题	155
8.1.1 离散和采样	155
8.1.2 连续变量的量化	157
8.1.3 转速和角位置测量	158
8.1.4 电压、电流等模拟量的测量	163
8.1.5 数字调节器	166
8.1.6 数字斜坡给定(给定积分)	169
8.1.7 数字晶闸管移相触发和无环流换向逻辑	174
8.1.8 开环前馈补偿(预控)	177
8.2 交-交变频调速数字矢量控制系统的特殊问题	179
8.2.1 多处理器系统	179
8.2.2 系统的构成及采样模式	180
8.2.3 数字控制系统中矢量回转器(VT)	181
8.2.4 数字矢量控制系统中的滞后补偿	182
8.2.5 数字控制系统中的电压模型	183
8.2.6 同步电动机矢量控制的转子位置测量	189
8.3 同步电动机交-交变频调速数字矢量控制系统实例	190
8.3.1 SIMADYN-D通用数字控制装置简介	191
8.3.2 同步电动机交-交变频调速系统的硬件配置	191
8.3.3 同步电动机交-交变频调速系统的软件框图	194
第9章 其他类型交-交变频器	207
9.1 定子双重绕组的12脉波交-交变频器	207
9.1.1 原理	207
9.1.2 控制方法	209
9.2 具有无功自动控制(SVC)功能的有环流交-交变频器	210
9.2.1 原理	210
9.2.2 无功控制方法	211
9.3 三角形交-交变频器	212
9.3.1 原理	212
9.3.2 控制方法	212
9.4 交-交与负载换相交-直-交电流型(CC/CSI)混合变频器	213
附录	219
附录A Dillingen Huettenwerke公司轧板厂交-交变频传	

动调查	219
附录 B 异步电动机等效电路	220
附录 C 电子最佳调节器设计	222
附录 D 调节器参数计算补充说明	223
参考文献	234

第 1 章 概 述

交流电动机比直流电动机结构简单, 成本低, 维护方便, 但由于变频装置昂贵及交流调速性能差, 长期以来在调速领域里一直是直传动占统治地位。近年来, 随着电力电子技术的发展, 情况有了变化, 与直流调速相比, 交流调速用变频装置增加的成本已被采用交流电动机而节约的成本所补偿, 采用矢量控制后, 交流调速的性能也能做到和直流调速的一样, 因此在许多直流调速的世袭领域里出现了以交流调速取代直流调速的趋势。交-交变频传动 (Cycloconverter-fed Drive) 是一种在大功率 (1000kW 以上) 低速 (600r/min 以下) 范围内广泛采用的交流调速方案, 正在轧机、矿山卷扬、船舶推进、水泥、风洞等传动中逐步取代传统的大功率直流调速, 取得了良好的技术经济效益。本书介绍交-交变频调速和矢量控制的原理、控制及计算方法。本章介绍一般情况: 交、直流调速比较, 交-交变频调速的应用范围, 所用电动机的特点以及发展概况。

1.1 交流调速传动和直流调速传动

直流调速控制简单, 调速性能好, 变流装置 (晶闸管整流装置) 容量小, 长期以来在调速传动中一直占统治地位, 但也具有下述缺点:

(1) 直流电动机结构复杂、成本高、故障多、维护困难, 经常因火花大而影响生产。

(2) 换向器的换向能力限制了电动机的容量和速度。直流电动机的极限容量和速度之积约为 $10^6 \text{ kW} \cdot \text{r/min}$, 许多大型机械的传动电动机已接近或超过该值, 设计制造困难, 甚至根本制造不出来。

(3) 为改善换向能力, 要求电枢漏感小, 转子短粗, 导致 GD^2 增大, 影响系统动态性能, 在动态性能要求高的场合, 不得不采用双电枢或三电枢, 带来造价高、占地面积大、易共振等一系列问题。

(4) 直流电动机除励磁外, 全部输入功率都通过换向器流入电枢, 电动机效率低, 由于转子散热条件差, 冷却费用高。

交流电动机没有上述缺点, 但调速困难。近年来, 随着电力电子技术的发展, 大功率交流调速的性能已达到直流传动的水平, 装置成本降低到与直流传动相当或略低的程度, 由于维修费用及能耗大大降低, 可靠性提高, 因此出现了以交流传动取代直流传动的强烈趋势。采用这项技术能取得下述效果:

(1) 减小维修工作量, 减少停机时间, 提高产量。以德国 Dillingen 厂 5.5m 厚板轧机为例, 直流主传动年维修工作量为 145h, 交流主传动只需 36h, 仅为直流传动时的 1/4。

(2) 可以突破直流电动机的功率、速度极限, 为设备提供更大的动力, 从而提高产量。仍以 5.5m 厚板轧机为例, 直流传动的最大功率为 $2 \times 8000\text{kW}$ (50/100r/min) 已达极限值。改成交流传动后, 主电动机功率提高了 36%, 达 $2 \times 10920\text{kW}$ (58.5/112.5r/min)。

(3) 减小电动机的转动惯量。以宝钢 2050mm 热连轧机为例, 直流主传动电动机为 $2 \times 4500\text{kW}$ (250/578r/min) 双电枢, 转动惯量为 $19.2\text{t} \cdot \text{m}^2$; 交流主传动电动机为 9000kW (250/578r/min) 单电枢, 转动惯量为 $4.3\text{t} \cdot \text{m}^2$, 减小为直流时的 1/4.5, 使速度响应时间由 120ms 减小到 80ms, 有利于提高产品产量和质量, 单电枢电动机比双电枢电动机节约厂房和基础面积。

(4) 节能、节水。仍以宝钢 2050mm 热连轧机电机为例, 每台交流主传动电动机比直流电动机减少损耗和冷却水约 50%, 如果 7 个机架主传动全用交流电动机, 按轧制时间 5400h/年计算, 年节电 1149 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 节水 196.5m^3 。

(5) 由于交流电动机结构简单, 因此有可能与机械合为一