



南京航空航天大学
研究生系列精品教材

现代交流调速技术

秦海鸿 聂 新 编著



科学出版社

南京航空航天大学研究生系列精品教材

现代交流调速技术

秦海鸿 聂 新 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以目前常用的三相感应电动机和同步电动机为主要对象,介绍了变频调速的基本原理和机械特性,交流电机综合矢量和坐标变换的概念,静止式变频器的原理及其 PWM 控制技术,感应电动机的开环控制、转差频率控制、矢量控制及直接转矩控制,他控变频同步电动机调速系统及自控变频同步电动机调速系统,开关磁阻电动机调速技术,以及 PWM 控制变频调速系统的一些实际问题。

本书可作为高等学校电气工程学科的硕士研究生及高年级本科生教材,也可供交流调速方面的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代交流调速技术 / 秦海鸿, 聂新编著. —北京: 科学出版社, 2016.1
ISBN 978-7-03-047177-2

I. ①现… II. ①秦… ②聂… III. ①交流电机—调速 IV. ①TM340.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 008714 号

责任编辑: 余 江 张丽花 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张: 14 1/4

字数: 330 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着电机技术、电力电子技术、自动控制理论和计算机控制技术的发展,现代交流调速技术迅速发展。现代交流调速系统在机械、电气、纺织、冶金、食品、国防等行业领域得到广泛的应用,几乎遍及国民经济各部门的传动领域。应用实践表明,采用现代交流调速技术显著提高了传动系统的运行质量。

本书以目前最常用的三相感应电动机和同步电动机为主要对象,介绍现代交流调速技术。本书的编写采用理论推导与实际问题讨论相结合的方法,遵循了深入浅出、循序渐进及理论联系实际的原则。对两种主要交流电机变频调速的基本特性,交流电机综合矢量和坐标变换,静止式变频器及其 PWM 控制技术,感应电动机和同步电动机变频调速系统,开关磁阻电动机调速系统,以及变频调速系统的一些实际问题进行了介绍。

全书共 7 章。绪论介绍了交流调速技术的概况和应用,交流调速系统的一般结构和基本类型,以及现代交流调速技术的发展趋势。第 1 章介绍了交流电机变频调速的基本原理和机械特性。第 2 章介绍了交流电机综合矢量和坐标变换的概念,讨论了感应电动机和同步电动机的动态数学模型。第 3 章介绍了静止式变频器的基本原理、构成及变频调速系统,探讨了常用的降低谐波的脉冲宽度调制技术。第 4 章介绍了感应电动机变频调速技术,对开环控制、转差频率控制、矢量控制及直接转矩控制等进行了讲解。第 5 章介绍了他控变频同步电动机调速系统及自控变频同步电动机调速系统。第 6 章介绍了开关磁阻电动机调速系统的基本原理、构成及其应用。第 7 章介绍了 PWM 变频器供电的交流电气传动系统中的一些实际问题。

本书可作为电气工程、控制科学与工程、机械电子工程等学科的研究生教材,也可用于电气工程及其自动化专业和自动化专业的高年级本科生教材,还可作为从事电气传动自动化、电机及其控制、电力电子技术和控制工程方面科研人员的参考书。

本书在南京航空航天大学朱震莲教授以及现代交流调速技术课程组校内自编教学讲义基础上改编修订而成,部分章节重点参考了陈伯时、陈敏逊教授编著的《交流调速系统》,韩国 Seung-ki Sul 著、张永昌教授等译的《电机传动系统控制》,张勇军教授等编著的《现代交流调速系统》。书中还参考和引用了相关同行专家的著作和学术论文,均在书后参考文献中列出,在此表示衷心的感谢!

本书由江苏省品牌专业教材建设专项资金和南京航空航天大学研究生教材专项资金资助,在此对学校研究生院和自动化学院在本书编写过程中的支持表示感谢。本书的文字录入工作及大部分插图的绘制工作得到了硕士研究生马策宇、王丹、刘清、徐克峰、谢昊天、荀倩、钟志远、余忠磊等的大力协助,在此一并向他们表示衷心的感谢。

由于学识水平有限,书中难免出现不足之处,敬请专家和读者给予批评指正。

作 者

2015 年 8 月于南京航空航天大学

目 录

前言

绪论	1
0.1 交流调速技术的发展概况和应用	1
0.1.1 交流调速技术的发展概况	1
0.1.2 交流调速技术的应用	3
0.2 交流调速系统的一般结构和基本类型	4
0.2.1 交流调速系统的一般结构	4
0.2.2 交流调速系统的基本类型	6
0.3 现代交流调速技术的发展趋势	7
第1章 交流电机变频调速的基本原理和机械特性	13
1.1 交流电机变频调速的基本原理	13
1.2 感应电动机变频调速的机械特性	14
1.2.1 恒压恒频时的机械特性	14
1.2.2 变频调速的机械特性	18
1.3 同步电动机变频调速的基本特性	24
1.3.1 同步电动机的物理模型	24
1.3.2 同步电动机变频调速的工作特性	24
思考题	27
习题	27
第2章 交流电机的数学模型	29
2.1 交流电机的综合矢量	29
2.2 交流电机中常用的坐标变换	33
2.2.1 $\alpha, \beta, 0$ 坐标系统	33
2.2.2 $+, -, 0$ 坐标系统	34
2.2.3 $d, q, 0$ 坐标系统	35
2.2.4 x, y 坐标系统	36
2.3 功率不变的坐标变换	37
2.4 感应电动机的数学模型	40
2.4.1 感应电动机的基本电磁关系	40
2.4.2 感应电动机的数学模型	47
2.5 同步电动机的数学模型	57
2.5.1 同步电动机的基本电磁关系	57
2.5.2 $d, q, 0$ 坐标轴系统同步电动机的数学模型	59

2.5.3	同步电动机用标幺值表示的 $d, q, 0$ 系统的数学模型	62
2.5.4	永磁同步电动机的数学模型	65
	思考题	66
	习题	66
第 3 章	静止式变频器和 PWM 控制技术	68
3.1	静止式变频器的主要类型	68
3.1.1	交-直-交和交-交变频器	68
3.1.2	电压源型和电流源型逆变器	72
3.1.3	180°导通型和 120°导通型逆变器	73
3.2	六拍交-直-交变频器输出电压的谐波分析	77
3.2.1	谐波分析	77
3.2.2	变频器输出谐波对感应电动机工作的影响	79
3.3	SPWM 控制技术	81
3.3.1	基本思想	81
3.3.2	SPWM 原理	82
3.3.3	SPWM 波的基波电压	86
3.3.4	PWM 的制约条件	87
3.3.5	同步调制与异步调制	88
3.3.6	SPWM 波的实现	90
3.3.7	SPWM 变频器的输出谐波分析	94
3.4	SHEPWM 控制技术	96
3.5	CHBPWM 控制技术	97
3.6	SVPWM 控制技术	101
3.6.1	电压空间矢量的概念	101
3.6.2	电压空间矢量的实现方法	103
3.6.3	电压空间矢量的特点	107
	思考题	107
	习题	107
第 4 章	感应电动机变频调速系统	108
4.1	感应电动机开环变频调速系统	108
4.2	感应电动机转差频率控制的变频调速系统	110
4.2.1	转差频率控制的基本概念	111
4.2.2	转差频率控制的规律	111
4.2.3	转差频率控制的 SPWM 变频调速系统	113
4.3	感应电动机矢量控制的变频调速系统	115
4.3.1	矢量控制的基本概念	115
4.3.2	电流控制型逆变器供电感应电动机磁场定向控制	116
4.3.3	电压型逆变器供电感应电动机磁场定向控制	126

4.4	感应电动机按定子磁链砰-砰控制的直接转矩控制系统	127
4.4.1	直接转矩控制系统的发展历史和基本特点	127
4.4.2	定子磁链和转矩反馈模型	128
4.4.3	定子电压矢量开关状态的选择	129
4.4.4	直接转矩控制系统与矢量控制系统的比较	131
4.4.5	改善直接转矩控制系统性能的方案	132
	思考题	133
	习题	134
第5章	同步电动机变频调速系统	135
5.1	概述	135
5.2	他控变频同步电动机调速系统	137
5.2.1	同步电动机转速开环恒压频比控制	137
5.2.2	隐极同步电动机的矢量控制	137
5.2.3	凸极同步电动机的矢量控制	141
5.2.4	稀土永磁同步电动机的矢量控制	145
5.2.5	同步电动机的制动	149
5.3	自控变频同步电动机调速系统	153
5.3.1	无刷直流电动机的构成及工作原理	154
5.3.2	无刷直流电动机的运行特性	164
5.3.3	直流变换器调压的无刷直流电动机	168
	思考题	172
	习题	172
第6章	开关磁阻电动机调速技术	173
6.1	概述	173
6.2	开关磁阻调速电动机基本原理	174
6.2.1	SRD 的工作原理	174
6.2.2	SRD 的特点	177
6.3	开关磁阻调速电动机的主要结构与分类	179
6.3.1	电机的结构与分类	179
6.3.2	功率变换电路	181
6.4	开关磁阻调速电动机的运行特性分析	182
6.4.1	线性模式分析	182
6.4.2	非线性模式分析	187
6.5	开关磁阻调速电动机的控制	191
6.5.1	正反转控制	191
6.5.2	低速斩波控制	191
6.5.3	高速单脉冲控制	192
6.5.4	调压调速控制	193

6.5.5 微机控制	193
6.5.6 再生运行控制	194
思考题	194
习题	195
第 7 章 变频调速系统的实际问题	196
7.1 电网侧输入谐波	196
7.2 死区引起的变频器输出电压畸变及其补偿方法	199
7.2.1 桥臂器件开关死区对 PWM 变频器工作的影响	199
7.2.2 死区影响的补偿	201
7.2.3 零电流钳位 (ZCC)	203
7.2.4 半导体开关器件寄生电容引起的电压畸变	203
7.2.5 开关时刻的预测	206
7.3 相电流测量	207
7.3.1 电流测量系统中延时的建模	207
7.3.2 电流中的偏置和定标误差	210
7.4 du/dt 及长距离电缆传输引起的绝缘问题	213
7.5 共模电压和轴电流问题	214
思考题	215
习题	215
参考文献	217

绪 论

0.1 交流调速技术的发展概况和应用

直流电气传动和交流电气传动在 19 世纪先后诞生。在 20 世纪上半叶, 由于直流传动具有优越的调速性能, 高性能可调速传动大都采用直流电动机, 而约占电气传动总功率 80% 以上的不变传动系统则采用交流电动机, 这在很长一段时期内成为一种举世公认的格局。交流调速系统的多种方案虽然早已问世, 并已获得实际应用, 但其性能却始终无法与直流调速系统相媲美。直到 20 世纪 60~70 年代, 随着电力电子技术的发展, 实现了采用电力电子变流器的交流传动系统, 而大规模集成电路和计算机控制技术的出现以及现代控制理论的应用, 更使高性能交流调速系统得到快速发展, 交直流传动按调速性能分工的格局终于被打破了。这时, 与交流电动机相比, 直流电动机的缺点日益显露出来, 例如, 因具有电刷和换向器而必须经常检查维修, 换向火花使它的应用环境受到限制, 换向能力限制了直流电动机的功率和转速等。于是, 用交流调速传动取代直流调速传动的呼声越来越强烈, 交流传动控制系统已经成为电气传动控制的主要发展方向。21 世纪初, 在全世界调速电气传动产品中, 交流传动已占 2/3 以上, 现在更已处于绝对优势的地位。

0.1.1 交流调速技术的发展概况

交流电动机, 特别是笼型感应电动机, 具有结构简单、制造容易、价格便宜、坚固耐用、运行可靠、维修简便等优点。但是, 长期以来由于受科技发展的限制, 把交流电动机作为调速电动机的困难问题未能得到较好的解决, 在早期只有一些调速性能差、低效耗能的调速方法, 如绕线式感应电动机转子外串电阻调速方法, 笼型感应电动机定子调压调速方法(利用自耦变压器的变压调速, 利用饱和电抗器的变压调速和利用晶闸管交流调压器调压调速), 还有变极对数调速方法及后来的电磁(转差离合器)调速方法等。

20 世纪 60 年代以后, 由于生产发展的需要和节能的迫切要求, 世界各国都重视起交流调速技术的研究与开发。尤其是 20 世纪 80 年代以来, 由于科学技术的迅速发展为交流调速的发展创造了极为有利的技术条件和物质基础。从此, 以变频调速为主要内容的现代交流调速技术迅速沿着下述四个方面发展起来。

1) 电力电子器件的蓬勃发展推动了交流调速技术的迅速发展

电力电子器件是现代交流调速系统的支柱, 其发展直接影响和决定着交流调速技术的发展。20 世纪 80 年代中期以前, 变频调速系统的功率电路主要采用晶闸管器件, 其效率、可靠性、成本和体积均无法与同容量的直流调速系统相比。80 年代中期以后采用第二代电力电子器件(包括 GTR、GTO、MOSFET、IGBT 等功率器件)制造的变频器,

在性能上与直流调速装置相当。90 年代第三代电力电子器件问世,在这个时期,中、小功率的变频器(1~1000kW)主要采用 IGBT 器件,大功率的变频器采用 GTO 器件。20 世纪 90 年代末至今,电力电子器件的发展进入了第四代,主要采用的器件如下。

(1)高压 IGBT 器件。沟槽式结构的 IGBT 问世,使 IGBT 器件的耐压水平由常规 1200V 提高到 4500V,实用功率容量为 3300V/1200A,表明 IGBT 器件突破了耐压限制,进入第四代高压 IGBT 阶段,与此相应的三电平 IGBT 中压(2300~4160V)大容量变频调速装置进入实用化阶段。

(2)IGCT(Insulated Gate Controlled Transistor)器件。ABB 公司把环形门极 GTO 器件外加 MOSFET 功能,研制成功全控型 IGCT(ETO)器件,使其耐压及容量保持了 GTO 的水平,但门极控制功率大大减小,仅为 0.5~1W。目前实用化的 IGCT 功率容量为 4500V/3000A,相应的变频器容量为(315~10000kW)/(6~10kV)。

(3)IEGT(Injection Enhanced Gate Transistor)器件。IEGT 是东芝公司研制的高压、大容量、全控型功率器件,它是把 IGBT 器件和 GTO 器件二者的优点结合起来的注入增强栅晶体管。IEGT 器件实用功率容量为 4500V/1500A,相应的变频器容量达 8~10MW。

由于 GTR、GTO 器件本身存在的不可克服的缺陷,功率器件进入第四代以来,GTR 器件已被淘汰不再使用,GTO 器件也将被逐步淘汰。用第四代电力电子器件制造的变频器性价比与直流调速装置相当。

第四代电力电子器件模块化更为成熟,如功率集成电路(PIC)、智能功率模块(IPM)等。

2)脉冲宽度调制技术

1964 年,德国学者 Schonung 和 Stemmler 提出将通信中的调制技术应用到电动机控制中,于是产生了脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术。PWM 技术的发展和优化了变频装置的性能,适用于各类调速系统。

PWM 种类很多,并且还在不断发展之中。基本上可以分为五类,即等宽 PWM、正弦波 PWM(SPWM)、消除指定次数谐波 PWM(SHEPWM)、电压空间矢量 PWM(SVPWM)及电流滞环跟踪 PWM(CHBPWM)。PWM 技术的应用克服了相控方法的所有弊端,使交流电动机定子得到了接近正弦波的电压和电流,提高了电动机的功率因数和输出功率。现代 PWM 生成电路大多采用具有高速输出口的单片机(如 80196)及高速数字信号处理器(DSP),通过软件编程生成 PWM。新型全数字化专用 PWM 生成芯片 HEF4752、SLE4520、MA818 等已实际应用。

3)矢量控制理论的诞生和发展奠定了现代交流调速系统高性能化的基础

20 世纪 70 年代德国学者 Blaschke 提出了交流电动机矢量控制理论,这是实现高性能交流调速系统的一个重要突破。

矢量控制的基本思想是应用参数重构和状态重构的现代控制理论概念实现交流电动机定子电流的励磁分量和转矩分量之间的解耦,将交流电动机的控制过程等效为直流电动机的控制过程,从而使交流调速系统的动态性能得到了显著的提高,使交流调速最终取代直流调速成为可能。目前对调速特性要求较高的生产工艺已较多地采用了矢量控制型的变频调速装置。实践证明,采用矢量控制的交流调速系统的优越性高于直流

调速系统。

针对电动机参数时变特点，在矢量控制系统中采用了自适应控制技术。毫无疑问，矢量控制在应用实践中将会更加完善，其控制性能将会得到进一步提高。

继矢量控制技术之后，在 1985 年由德国学者 Depenbrock 提出的直接自控制(DSC)的直接转矩控制以及在 1986 年由日本学者 Takahashi 提出的直接转矩控制都取得了实际应用的成功。近三十年的实际应用表明，与矢量控制技术相比，直接转矩控制可获得更大的瞬时转矩和快速的动态响应，因此，交流电动机直接转矩控制也是一种很有发展前途的控制技术。目前，采用 IGBT、IEGT、IGCT 等功率器件构成的直接转矩控制变频器已广泛应用于工业生产及交通运输部门。

4) 微型计算机技术的迅速发展和广泛应用

微型计算机控制技术的迅速发展和广泛应用为现代交流调速系统的成功应用提供了重要的技术手段和保证。近三十多年来，微型计算机控制技术，特别是以单片机及数字信号处理器为控制核心的微型计算机控制技术的迅速发展和广泛应用，促使交流调速系统的控制电路由模拟控制迅速走向数字控制。当今全数字化的交流调速系统已普遍应用。

数字化使得控制器的信息处理能力大幅度提高，许多难以实现的复杂控制，如矢量控制中的坐标变换运算、解耦控制、滑模变结构控制、参数辨识的自适应控制等，采用微型计算机控制器后便都迎刃而解了。此外，微型计算机控制技术又给交流调速系统增加了多方面的功能，特别是在故障诊断技术方面得到了完全的实现。

微型计算机控制技术的应用提高了调速的可靠性以及操作、设置的多样性和灵活性，降低了变频调速装置的成本和体积。以微处理器为核心的数字控制已成为现代交流调速系统的主要特征之一。

交流调速技术的发展过程表明，现代工业生产及社会发展的需要推动了交流调速技术的发展；现代控制理论的发展和应用、微型计算机控制技术及大规模集成电路的发展和应用为交流调速技术的发展创造了技术和物质条件。

20 世纪 90 年代以来，电气传动领域面貌焕然一新。各种类型的感应电动机变频调速系统、各种类型的同步电动机变频调速系统几乎覆盖了电气领域的各个方面。电压等级从 110V 到 10000V，容量从数百瓦的伺服系统到数万千瓦的特大功率调速系统，从一般要求的调速传动到高精度、快速响应的高性能调速传动，从单机调速传动到多机协调调速传动，几乎无所不有。

0.1.2 交流调速技术的应用

目前，交流传动系统的应用领域主要有以下三个方面。

1) 一般性能的节能调速和按工艺要求调速

在过去大量的所谓“不变速交流传动”中，风机、水泵等通用机械的电动机功率几乎占电气传动总功率的一半，其中不少场合并不是不需要调速，只是因为过去的交流传动本身不能调速，不得不依赖挡板和阀门来调节送风和供水的流量，因而把许多电能都白白浪费了。如果把这些不变速交流传动改造成交流调速系统，把消耗在挡板和阀门上的能量节省下来，则每台风机、水泵平均都可以节约 20%~30% 的电能，其效果是很可

观的，而且风机、水泵对调速范围和动态性能的要求都不高，只要有一般的调速性能就足够了。

许多在工艺上需要调速的生产机械过去多用直传动，鉴于交流电动机比直流电动机结构简单、成本低廉、工作可靠、维护方便、转动惯量小、效率高，如果改用交流传动，则显然能够带来不少的效益，于是一般按工艺要求需要调速的场合也纷纷采用交流调速。

2) 高性能的交流调速系统和交流伺服系统

由于交流电动机的电磁转矩难以像直流电动机那样与电枢电流成正比的直接控制，交流调速系统的控制性能在历史上一直赶不上直流调速系统。直到 20 世纪 70 年代初科技工作者发明了矢量控制技术，通过坐标变换，把交流电动机的定子电流分解成转矩分量和励磁分量，分别控制电动机的转矩和磁通，可以获得和直流电动机相仿的高动态性能，才使交流电动机的调速技术取得了突破性的进展。其后，又陆续提出了直接转矩控制、解耦控制等方法，形成了一系列可以和直流调速系统相媲美的高性能交流调速系统和交流伺服系统。

3) 直流调速难以实现的领域

直流电动机的换向能力限制了它的功率转速积不能超过 $10^6 \text{kW} \cdot \text{r/min}$ ，否则其设计与制造就非常困难了。交流电动机没有换向问题，不受这种限制。因此，在以下领域交流调速系统能大显身手。

(1) 特大容量的传动设备，如厚板轧机、矿井卷扬机、电力机车和风力发电机等。

(2) 极高转速的传动，如高速磨头和离心机等。

(3) 对功率密度比、体积密度比的要求较高的系统，如电力机车、电动汽车和电动船舰等。

(4) 要求防火、防爆的场所。

0.2 交流调速系统的一般结构和基本类型

0.2.1 交流调速系统的一般结构

现代交流调速系统一般由交流电动机、电力电子功率变换器、控制器、检测器和人机界面等组成(见图 0.1)，其中前四个部分是最基本的组成，人机界面并非必需的，根据系统要求可选择性采用。电力电子功率变换器、控制器、电量检测器通常集成于一体，称为变频器或变频调速装置。

1. 电动机

在交流调速系统中，常用的电动机可分为以下几种类型。

(1) 感应电动机。

(2) 同步电动机。

(3) 开关磁阻电动机。

(4) 其他特种交流电动机。

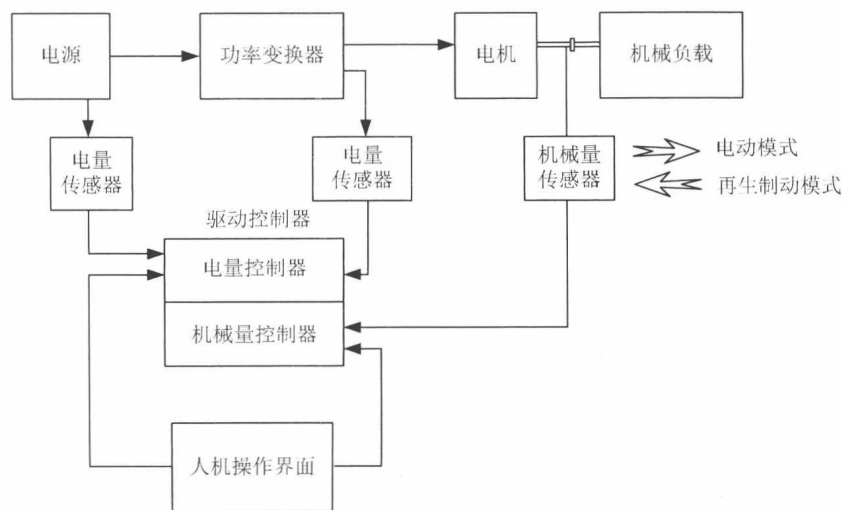


图 0.1 现代交流调速系统的一般组成结构

在不同的应用场合所选用的电动机类型也不同，主要应考虑如下因素。

- (1) 负载的转速-转矩特性。
- (2) 启动和运行功耗。
- (3) 峰值转矩过载能力。
- (4) 电动机耐热等级。
- (5) 备品备件及维护人员要求。

2. 电力电子功率变换器

选择适宜的电力电子变换器与所选电动机相匹配是非常重要的。电力电子变换器电流等级需满足所选电动机稳态及峰值转矩对应的电流大小，同时电压等级需满足电动机端最高电压峰值。由于本书重点论述交流电动机的传动系统，故所讨论的变流器类型基本属于 DC/AC 逆变器(少数由交流直接变换使用的 AC/AC 变换器，如周波变换器和矩阵变换器)。

DC/AC 逆变器可按广义分为两种类型：电压源型逆变器(VSI)以及电流源型逆变器(CSI)。两者相比，电压源型逆变器的应用更为普遍，电压源型逆变器的电压控制通常采用 PWM 实现。电流源型逆变器为电动机端提供经开关波形调制过的电流供电，并通过直流母线上所带的大容量电感保持该电流输出。

图 0.2 所示的三相电压源型逆变器在三相交流电机供电中应用最为广泛。交流电压经整流器整流后，供给桥式逆变器。直流母线输入端并联一个大电容器，用来缓冲逆变器工作时产生的充电电流冲击。该电容器容量较大，通常可达 2000~10000 μ F。现在，除了某些大功率应用场合必须在逆变回路中采用 GTO 之外，其他中小功率场合普遍采用功率 MOSFET、IGBT 等功率开关器件。三相电压源型逆变器可以在 180° 导通角或 120° 导通角两种模式下运行。由于 180° 导通角在各种工作状态下均具有更好的开关利

用率，并能够提供更高的输出电压，所以这种方式的应用更为广泛。

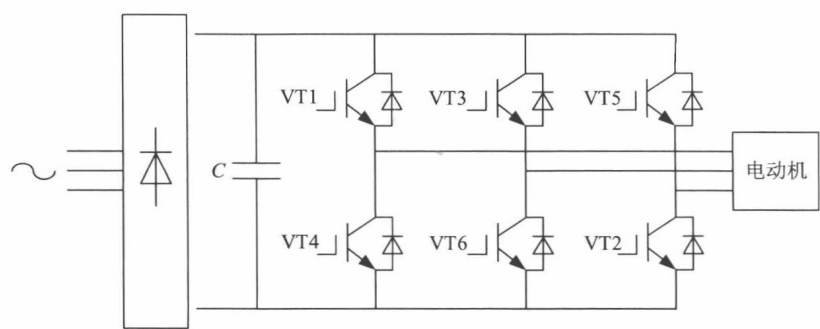


图 0.2 三相桥式逆变器

3. 控制器和检测器

电机控制器将电动机特性与负载实际运行进行匹配，现在已针对不同交流电动机的驱动形式开发出多重控制策略。

电量控制器通过控制电力电子变换器的电流、电压、磁链及转矩输出达到控制目的。相应的传感器(检测器)将测量到或计算出的电压、电流、磁通量反馈给控制器。传感器输入的信号由电源输入端和变换器输出端取得。控制器输出用于调节改善变换器的工作状态(如提高功率因数、降低谐波等)。

机械量控制器输入信号由机械量传感器提供，机械量传感器提供与位置、速度或转矩相关的状态量反馈。机械量控制器输出信号用于控制相关速度、位置或转矩输出。

电量控制器和机械量控制器结合使用，并且通过数字-模拟量输出电路来实现控制目的。当前的普遍趋势是采用微处理器或数字信号处理器作为控制器，特别在高性能交流调速系统中的应用更为广泛。

4. 人机界面

在电气传统系统应用的很多领域，为方便人员与内含计算机的机器进行信息交互，通常会设置人机界面。人机界面可以把信息简单地分为“输入”(input)与“输出”(output)两种，输入通常是指由人员来进行机械或设备的操作，如把手、开关、按键、门、指令(命令)的下达或保养维护等，而输出是指由机械或设备发出来的通知，如故障、警告、操作说明提示等，好的人机界面接口会帮助使用者更简单、更正确、更迅速地操作机械，也能使机械发挥最大的效能并延长使用寿命，在电气传统系统中越来越成为不可缺少的环节。

0.2.2 交流调速系统的基本类型

现代交流调速系统可分为感应电动机调速系统和同步电动机调速系统两大类，每种调速系统又有不同类型的调速方法。

(1)感应电动机交流调速系统,按转差功率处理方式的不同可分为转差功率消耗型调速系统、转差功率回馈型调速系统和转差功率不变型调速系统三类。

(2)同步电动机调速系统根据频率控制方式的不同可分为两类：他控式同步电动机

调速系统,如永磁同步电动机、磁阻同步电动机;自控式同步电动机调速系统,如负载换相自控式同步电动机调速系统(无换向器电动机)、交-交变频供电的同步电动机调速系统。

(3)开关磁阻电动机交流调速系统在本质上是一种特殊形式的同步电动机调速系统,是由开关磁阻电动机、功率变换器、控制器和传感器等几部分安装在一起的一种新型机电一体化调速装置,电动机结构十分独特,转子上无绕组,定子上采用集中绕组,线圈安装容易,端部短而牢固,在结构上比传统的同步电动机和感应电动机都简单,制造和维修十分方便。有比较独特的调速方法,在中小功率交流电动机调速系统中很有发展前途。

0.3 现代交流调速技术的发展趋势

交流调速取代直流调速已是不争的事实,21世纪必将是交流调速的时代。当前交流调速系统正朝着高电压、大电容、高性能、高效率、绿色化、网络化的方向发展。主要表现在以下方面。

- (1)新型电力电子器件的研究开发与应用。
- (2)高性能交流调速系统的进一步研究与开发。
- (3)新型功率变换拓扑结构的研究与开发。
- (4)PWM模式的改进和优化。
- (5)中压变频装置(我国称为高压变频装置)的开发研究。

现代交流调速技术发展的趋势如下。

1. 电力电子器件与材料的更新

全控型器件向高压、大电流方向发展。在提高现有电力电子开关器件性能的同时,人们不断研究新型结构和材料的电力电子器件。

(1)降低 MOSFET 的通态电阻,提高电压等级。在对 Si 基 MOSFET 器件改进中已取得或正在研究的方向为:①Cool MOS——通态电阻只有常规 MOS 管的 1/10 左右,工作电压可以提高到 1200V;②超低通态电阻 MOSFET——可用于新型汽车电源(36~42V)和计算机电源(1V,甚至更低),工作电流可达 100A;③超高频 MOSFET——工作频率达到几百 MHz,甚至几 GHz,进入微波频段,使超高频设备实现全固态化。

(2)研制集成电力电子模块(Integrated Power Electronic Module, IPEM)。IPEM 内含功率器件、各种集成芯片、传感器、磁性元件等完整的电力电子系统,无引线或用无感母线连接,采用标准模块封装技术,提供功率传输接口和数据通信接口。实现标准化、模块化、集成化、高可靠性、高效率、高功率密度、低成本、低污染和可编程等特色 and 优势。

(3)采用新型半导体材料——碳化硅(SiC)。碳化硅是一种新型的半导体材料,具有宽禁带间隙、高电子饱和漂移速度、高热导率、耐高压、抗辐射等突出优点,特别适合制作大功率、高频、高温半导体器件。自从 20 世纪 90 年代初期 SiC 单晶材料应用以来,

目前 SiC 基础材料的研究已经取得突破性进展, 4 英寸、6 英寸零微管缺陷密度的 SiC 衬底已经推向市场。目前已有 SiC 肖特基二极管、SiC MOSFET、SiC JFET 和 SiC BJT 的单管和模块面向市场, 其器件性能比现有的 Si MOSFET 和 Si IGBT 有了很大提升, 应用于相同等级的电气传动系统中, 可获得更高的效率、功率密度和更快的动态响应性能。目前不少 SiC 器件制造商已经推出耐高压碳化硅二极管和可控器件, 预计不久的将来耐压上万伏的大功率碳化硅器件将会在市场上出现, 从而改变中压大功率电气传动的格局。

2. 控制理论与控制技术方面的研究与开发

十几年的应用实践表明, 矢量控制理论及其他现代控制理论的应用尚待随着交流调速的发展而不断完善, 从而进一步提高交流调速系统的控制性能。各种控制结构所依据的都是被控对象的数学模型, 因此, 为了建立交流调速系统合理的控制结构, 仍需对交流电动机数学模型的性质、特点及内在规律做深入研究和探讨。

按转子磁链定向的感应电动机矢量控制系统实现了定子励磁电流和转矩电流的完全解耦, 然而转子参数估计的不准确及参数变化造成定向坐标的偏移是矢量控制研究中必须解决的重要问题之一。

直接转矩控制技术在应用实践中不断完善和提高, 其研究的主攻方向是进一步提高低速时的控制性能, 以扩大调速范围。

实现无硬件测速传感器的系统已有许多应用, 但是转速推算精度和控制的实时性仍有待于深入研究与开发。

为了进一步改善和提高交流调速系统的控制性能, 国内外学者致力于将先进的控制策略引入交流调速系统中, 例如, 滑模变结构控制、非线性反馈线性化控制、Backstepping 控制、自适应逆控制、内模控制、自抗扰控制和智能控制等, 已经成为现代交流调速技术发展中新研究内容。

3. 变频器主电路拓扑结构研究与开发

提高变频器的输出效率是电气传动技术发展中需要解决的重要问题之一。提高变频器输出效率的主要措施是降低电力电子器件的开关损耗。具体解决方法是研究开发新型拓扑结构的变换器, 例如, 20 世纪 80 年代中期美国威斯康星大学 Divan 教授提出的谐振直流环逆变器, 可使电力电子器件在零电压或零电流下转换, 即工作在所谓“软开关”状态下, 从而使开关损耗降低到接近于零。

此外, 逆变器正朝着高频化、大功率方向发展, 这使装置内部电压、电流发生剧变, 不仅使器件承受很大的电压、电流应力, 而且在输入、输出引线及周围空间里产生高频电磁噪声, 引发电气设备误动作, 这种公害称为电磁干扰 (Electromagnetic Interference, EMI)。抑制 EMI 的有效方法也是采用软开关技术。具有软开关功能的谐振逆变器, 国内外都在积极进行研究与开发。串并联谐振式变频器将会有越来越多的应用。

针对交-交变频器的输出频率低 (不到供电频率的 $1/2$) 的缺点, 20 世纪 80 年代人们开始研究矩阵式变频器 (matrix converter), 如图 0.3 所示。矩阵式变频器是一种可选择的

交-交变频器结构，可以扩展成 AC-DC、DC-AC 或 AC-AC 转换，且不受相数和频率的限制，并且能量可以双向流动，功率因数可调。尽管这种变频器所需功率器件较多，但它的一系列优点已经引起人们的广泛关注。

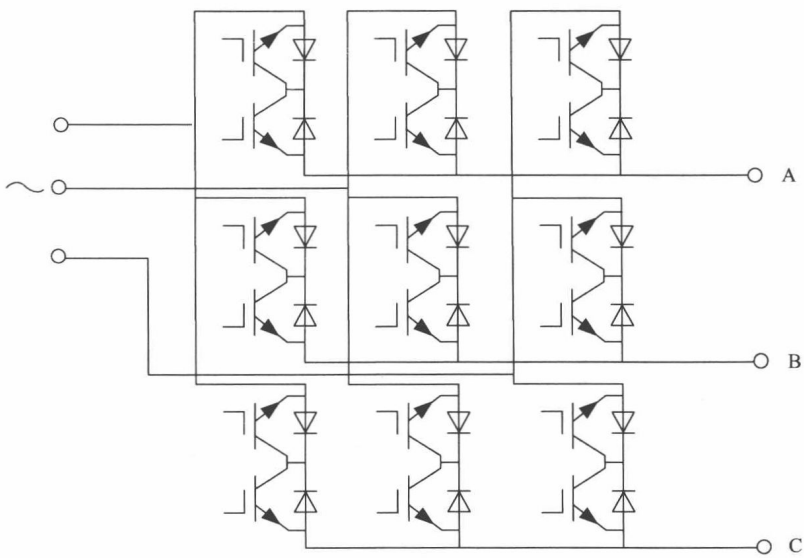


图 0.3 矩阵式变频器主电路原理图

具有 PWM 整流器和 PWM 逆变器的背靠背“双 PWM 变频器”（见图 0.4）已进入实用化阶段，并且迅速向前发展。这种变频器的变流功率因数为 1，能量可以使双向流动，网侧和负载侧的谐波量比较低，减少了对电网的公害和电动机的转矩脉动，被称为“绿色变频器”，代表了交流调速一个新的发展方向。

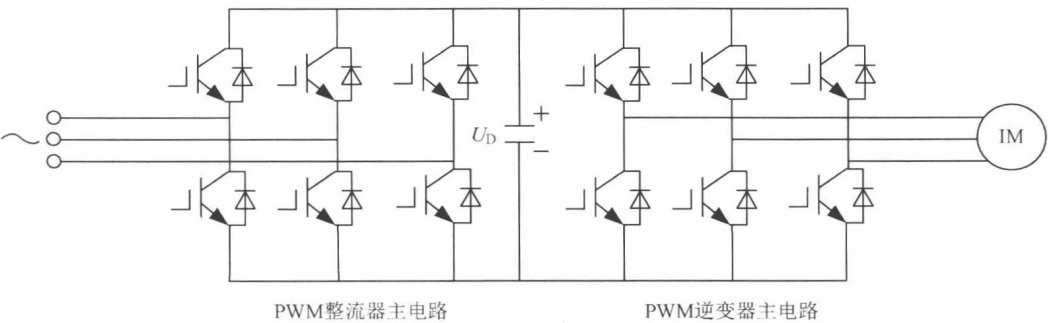


图 0.4 由三相两电平变流器构成的背靠背双 PWM 变频器主电路(12 开关)

4. PWM 模式的改进与优化研究

近年来，随着中压变频器的兴起，对于 SVPWM 模式进行了改进和优化研究，其中为解决三电平中压变频器中点电压偏移问题，研究了虚拟电压矢量合成 PWM 模式(不产生中点电压偏移时的电压长矢量、短矢量、零矢量的组合)，已取得了具有实用价值的研究成果；用于级联式多电平中压变频器的脉冲移相 PWM 技术已有应用。