

变频器的选型 配置与维护技术

段苏振 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

变频器的选型 配置与维护技术

段苏振 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书以变频器用户的视角,从变频器的技术原理到现场实践、从设计到应用,由浅入深地阐述了变频器的调速原理与控制特性、变频器在不同行业应用时的正确选型与配置、变频器的维修与故障处理,以及变频器在通用机械行业、重工业、轻工业、公用事业和民用产品制造业中的应用技巧。此外,本书还列举了大量不同类型的变频器在各个行业的实际应用方案及其配置参数,并以翔实的数据说明了变频器在各个行业应用的效果和产生的社会效益。

本书内容丰富,实用性强,可供从事变频调速的电气、自动化领域的工程技术人员使用,也可供各大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

变频器的选型、配置与维护技术/段苏振编著. —北京:
中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-8982-0

I. 变… II. 段… III. 变频器—基本知识 IV. TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 098357 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 1 月第一版 2010 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 33 印张 811 千字

印数 0001—3000 册 定价 59.80 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

变频器主要用于交流电动机（异步电动机或同步电动机）转速的调节，是目前公认的交流电动机最理想、最有前途的调速方案，除了具有卓越的调速性能之外，变频器还有显著的节能效果和优异的工艺控制方式，是广大工矿企业进行设备技术改造和产品更新换代的理想调速装置。自 20 世纪 80 年代被引进我国以来，变频器作为节能应用与速度工艺控制中越来越重要的自动化设备，被越来越多的人所熟知和接受，得到了快速发展和广泛地应用。在电力、机械、交通车辆、纺织与化纤、建材、石油、化工、冶金、市政、造纸、食品饮料、烟草等行业以及公用工程（中央空调、供水、水处理、电梯等）中，变频器的应用在不断拓展，发挥着日益重要的作用。

作者在自动化行业从业十余年，先后从事与变频器相关的设备技术改造、港口机械设计和变频器产品推广应用等工作，长期关注国内外变频器技术的最新发展与动向，在变频器的设计、选型和应用等方面积累了一定的经验，先后在国内核心、重要科技期刊《电气传动》、《电气传动自动化》、《起重运输机械》、《变频器世界》、《PLC&FA》、《变频技术应用》、《机床电器》和《电世界》等杂志公开发表了 10 万多字的技术论文共 25 篇，并有 6 篇论文在国内知名学术团体和传媒组织的全国性论文大赛中获奖。本书是作者在总结十余年实践经验的基础上，参考最新的国内外变频器技术资料，编写的一本关于变频器在不同行业应用时的正确选型与配置、维修与故障处理及应用技巧等的参考书籍。

本书以变频器用户的视角，从变频器的技术原理到现场实践、从设计到应用，由浅入深地阐述了变频器的调速原理与控制特性、变频器在不同行业应用时的正确选型与配置、变频器的维修与故障处理，以及变频器在通用机械行业、重工业、轻工业、公用事业和民用产品中的应用技巧。本书的编写原则是避开高深的理论，以物理概念为主，具有简明扼要、通俗易懂、实用性强的特点，力图为广大从事变频器应用技术的设计、销售、服务等电气技术人员和大专院校相关专业的师生提供一本实用的技术参考书。

在本书编写过程中，许多变频器厂商及相关人员及时提供了技术支持和帮助，书中参考和引用了国内外许多专家、学者的论文和著作等资料，在此一并致谢。

限于本人水平，书中难免存在不足和错误，恳请广大读者批评指正，将不胜感谢。

作者

2009 年 11 月

前言

第一章 总论	1
第一节 电气调速传动的发展	1
第二节 变频器的发展	7
第三节 变频调速技术的应用	14
第四节 变频器的市场	27
第二章 变频技术应用基础	32
第一节 交流异步电动机和负荷的特性	32
第二节 异步电动机变频调速的控制方式及特性	36
第三节 变频器的基本原理及特点	52
第四节 变频器的防护结构和散热	99
第三章 变频器的正确选型	103
第一节 根据负荷特性选择变频器	103
第二节 变频器的容量计算	145
第三节 变频器的功能设置	149
第四节 变频器的电气制动	188
第五节 变频器的通信	197
第四章 变频器的外围配置	252
第一节 变频器的配套设备	252
第二节 变频器的安装与接线	259
第三节 变频器的谐波及治理对策	272
第五章 变频器的维修与故障处理	304
第一节 变频器的预防性维修	304
第二节 变频器的保护功能及故障处理	311
第三节 常见变频器的修理	325
第六章 变频器的应用	348
第一节 变频器的应用概况	348
第二节 变频器在通用机械行业中的应用	352
第三节 变频器在轻工业中的应用	380
第四节 变频器在重工业中的应用	413
第五节 变频器在公用事业和民用产品中的应用	483
参考文献	518



第一章

总 论

1956 年晶闸管的问世标志着电力电子技术的开端,经过 50 多年的发展,电力电子技术已经成为一门多学科互相渗透的综合性技术学科,它包括电力电子器件、变流电路和控制技术三部分,其中以电力电子器件的制造与应用为核心技术。电力电子技术是电力、电子和控制三大电气工程技术领域之间的交叉学科,又与微电子技术、现代控制理论、材料科学、电机工程等诸多领域密切相关。

当代电气领域的许多高新技术均与电网的功率、电压、电流、频率和相位等基本参数的变换和控制有关。电力电子技术能够实现对这些电量参数的高精度控制和高效率处理,特别是能够实现大功率电源的频率变换。电力电子技术已从开始的整流、交直流可调电源,发展到广泛应用于新型电气传动、不间断电源、电网无功和谐波补偿、感应加热、电焊接技术、照明控制、风力发电、高压直流输电、超声波电源和新型电池的电源变换等诸多新兴领域,因此可以说电力电子技术已由当年的整流时代进入今天的逆变(变频)时代。现代电力电子技术也正向着集成化、高频化、全控化和数字化方向发展,已成为世界范围内的一项重要产业,为节约电能、降低材料消耗和提高生产效率提供了重要的手段,并为现代生产和现代生活带来了深远的影响。本书拟就变频技术在电气传动中的应用进行讨论。

 第一节 电气调速传动的发展

电气传动是用各种电动机使工作机械产生运动的一种调速传动方式。它按照电动机的不同,一般分为直流电气传动和交流电气传动两大类。

直流电气传动和交流电气传动在 19 世纪依次诞生。由于直流传动易于实现调压、调磁调速,并有成熟的控制理论和控制系统,可以满足工业生产发展不断提出的宽调速、高精度和快速响应的要求,所以在 20 世纪的大部分年代里,高性能的调速系统都采用直流调速传动,而约占电气传动总容量 80% 的不变速电气传动则采用交流电气传动,这种分工在一段时间里已成为举世公认的格局。交流调速传动的控制原理很早就被确立,异步电动机降电压调速,绕线转子异步电动机转子串电阻调速等虽已实用化,但在调速范围、稳定性、可靠性和维修性等方面有些不足,应用范围受到限制。1965 年以后,由于电力电子技术的不断发展和进步,伴随着新的控制理论的提出与完善,使交流调速传动,尤其是性能优异的变频调速传动得到飞速的发展。绕线转子异步电动机的串级调速,采用变频器的无换向器电动机调



速, 笼型异步电动机的变频调速等依次实用化, 完成了以变频调速为主流的交流调速传动的基础。现代矢量技术的应用, 使交流调速传动也具备了直流调速传动的高性能。直流电动机的换向器是它的主要薄弱环节, 它使直流电动机的单机容量、过载能力、最高电压和最高转速等重要技术指标受到限制, 也给直流电动机的制造和维护带来了不少麻烦, 这些缺点, 在很大程度上限制了直流电动机的应用。交流变频调速传动中的笼型异步电动机结构简单、坚固耐用、运行可靠、维护方便、转动惯量小、动态性能好, 其单机容量、电压等级和最高转速等技术指标均优于直流电动机。目前, 高性能的交流变频调速系统已完全可以和直流调速系统相媲美, 而且可以在直流电动机无法应用的场合使用。直流调速传动一统天下的旧格局已被打破, 用交流调速传动取代直流调速传动已成为可能。

一、直流电气传动

直流电气传动三种典型的调速方式及其主要特点见表 1-1。

表 1-1 直流电气传动三种典型的调速方式及其主要特点

调速方式	主 要 特 点	适用范围
调节电枢电压	直流电动机的磁通 Φ = 常值, 转速 n 随着电枢电压 U 的减小而降低, 改变电枢电压 U 的方向也可以改变电动机的转向。低速时, 机械特性的斜率不变, 稳定性好。电枢电流保持不变时, 输出转矩 T 也保持不变, 转速 n 与电枢电压 U 成正比, 输入、输出功率随 U 和 n 的降低而减小, 效率基本不变。这种调速方法的调速范围宽、动态性能好, 因此得到广泛应用	额定转速以下的恒转矩调速
调节励磁磁通	直流电动机的电枢电压 U = 常值, 转速 n 随着励磁电流 I_f 和电动机磁通 Φ 的减小而升高, 改变励磁电流 I_f 的方向也可以改变电动机的转向。一般最低速为电动机的额定转速, 最高速受电动机换向器和电枢机械强度的限制, 调速范围较小。电枢电流保持不变时, 输出转矩 T 与电动机磁通 Φ 成正比, 转速 n 与电动机磁通 Φ 成反比, 输入、输出功率及效率基本不变	额定转速以上的恒功率调速
改变电枢附加电阻	直流电动机的电枢电压 U = 常值, 转速 n 随着电枢回路电阻 R 的增加而降低, 转速越低, 电动机的机械特性越软。这种调速方式的变速电阻器也可用作起动电阻。当电枢电流保持额定值不变时, 输出转矩 T 也保持不变, 可用于恒转矩调速场合, 但低速时, 输出功率随转速 n 的降低而减小, 而输入功率不变, 效率将随转速的降低而降低, 经济性很差	额定转速以下, 不经常调速, 机械特性较软的调速场合

上述三种典型的直流电气传动调速方式, 在实践应用中往往相互配合使用。一般将调节电枢电压和调节励磁磁通这两种方法结合起来使用, 以扩大调速范围。调节电枢电压和调节励磁磁通这两种方式效率都比较高。而改变电枢附加电阻的调速方式, 随着附加电阻的增大, 电动机的铜损也随之增大, 调速系统的稳定性变差, 因此这种调速方式在实践中很少采用。

调节电枢电压调速是直流电气传动调速系统在实践中应用最广的方法, 而要调节电枢供电电压需要有专门的可控直流电源。早期是由交流电动机拖动直流发电机实现变流, 由直流发电机给需要调速的直流电动机供电, 调节发电机的励磁电流即可改变其输出电压, 从而改变直流电动机的转速。这种调速系统简称 G-M 调速系统, 它可以四象限运行。由于该系统至少需要两台与所需调速直流电动机容量相当的旋转电动机和交磁扩大机、磁放大器等外围设备, 因而整个调速系统设备多、体积大、噪声大、费用高、效率低、维护不方便。为了克服这些缺点, 20 世纪 50 年代开始采用汞弧整流器和闸流管等静止变流装置来代替 G-M 调

速系统。20 世纪 60 年代又开始采用更为经济可靠的晶闸管静止变流装置,由晶闸管变流器向直流电动机供电的调速系统简称 V-M 调速系统,晶闸管变流器的功率放大倍数和控制作用的快速性也远优于 G-M 调速系统。进入 20 世纪 70 年代后,随着电力电子技术的快速发展,相继出现了可商业应用的耐高压、大电流的可控制关断的全控式电力电子器件,如电力晶体管 (GTR)、可关断晶闸管 (GTO)、电力电子场效应晶体管 (PowerMOSFET)、绝缘栅双极晶体管 (IGBT)、MOS 控制晶闸管 (MCT) 等新型电力电子器件。采用全控型开关器件很容易实现脉冲宽度调制 (PWM),与半控型开关器件晶闸管相比,变流装置的体积可以缩小 30% 以上,装置的效率和功率因数均得到提高。同时,由于变流装置开关频率的提高,直流脉冲宽度调制调速系统 (PWM) 与 V-M 调速系统相比,具有电流容易连续、谐波小、电动机损耗和发热降低、低速性能优异、调速范围得到提高、稳速精度高、快速响应性好和动态抗干扰能力强等诸多优点。

调节电枢电压直流电气传动调速系统三种典型调速方式的特点见表 1-2。

表 1-2 调节电枢电压直流调速系统典型调速方式及其主要特点

调速方式	主 要 特 点	适 用 范 围
G-M 调速系统	可以四象限运行,但设备多、体积大、费用高、效率低、噪声大、调速范围小 ($D \leq 20$)、稳态精度差、可靠性不高、可维修性差	在 20 世纪 80 年代以前大量应用,现在已趋于淘汰
V-M 调速系统	分不可逆和可逆 V-M 调速系统,可逆 V-M 调速系统能四象限运行,属于静止变流装置,设备少、体积较小、效率高、调速范围较大 ($D \leq 50$)、稳态精度高、可靠性高、经济性好、快速响应性不强、谐波大	它具有众多的优点,现已由早期的模拟控制发展到全数字控制,在工程实践中大量应用
PWM 调速系统	它属于新一代静止变流直流调速系统,具有设备少、体积小、效率高、调速范围大 ($D \leq 1000$)、稳态精度高、可靠性高、快速响应性强、谐波较小	由于它具有优异的控制性能,因此主要应用于要求调速范围大、高精度、动态响应性好的场合,例如高档数控机床、工业机器人和高档光机电一体化产品等

直流电气传动经过近一个世纪的发展和完善,不论从电力电子器件,还是经典的控制理论,都有成熟的技术在工程实践中广泛应用。但是,众所周知,由于结构上的原因,直流电动机存在以下缺点。

- (1) 需要定期更换电刷和维护换向器,使用寿命短,维护保养困难。
- (2) 由于直流电动机存在换向火花,难以应用于存在易燃易爆气体的恶劣环境。
- (3) 结构复杂,难以制造出大容量、高转速和高电压的直流电动机。

综上所述,虽然直流电动机在 20 世纪的大部分时间里占据电气调速传动的主导地位,但由于它存在电刷和换向器这个薄弱环节,再加上体积大等因素,限制了它的应用范围。

二、交流电气传动

与直流电动机相比,交流电动机具有以下优点。

- (1) 坚固耐用、结构简单、运行可靠、维护方便、价格低廉。
- (2) 不存在换向火花,可以应用于存在易燃易爆气体的恶劣环境。
- (3) 容易制造出大容量、高转速和高电压的交流电动机。



虽然在 20 世纪的大部分时间里,直流调速系统占据了电气调速传动的主导地位,但是由于它存在固有的缺陷,各国的科学家和技术人员一直在探索,希望在大多数要求调速传动的场合能够用可调速的交流电动机来代替直流电动机,并在交流电动机的调速控制方面进行了大量的研究开发工作。

对于交流电动机的调速传动,其控制的基本原理很早就被确立,绕线转子电动机转子串电阻调速、绕线转子电动机串级调速、异步电动机定子调压调速、电磁转差离合器调速、变极对数调速等,但在调速范围、稳速精度、快速响应性、稳定性、可靠性和可维修性等诸多方面有些不足,因此这些交流电动机的调速方式在工程实践中的使用范围受到限制。也正是由于这个原因,在工业生产中大量使用的诸如风机、水泵等需要电气调速传动的场合,不得不采用挡板和阀门来调节风速和流量。这不但增加了系统的复杂度,而且造成了能源的大量浪费。

20 世纪 70 年代,席卷世界先进工业国家的石油危机,使人们充分认识到了节能工作的重要性,并进一步重视和加强了对高效节能的交流调速技术的研究开发工作。随着电力电子技术、微电子技术和控制理论的发展,绕线转子异步电动机静止串级调速、采用变频器进行同步电动机调速的无换向器电动机、普通异步电动机变频调速等依次实现实用化,完成了以变频器调速为主流的基础。到了 20 世纪 70 年代末,一直被认为是天经地义的交直流电气传动按调速分工的格局终于被打破。此后,交流电气传动调速系统主要沿着下述三个方向发展和应用。

1. 一般性能的节能调速和工艺调速

风机、水泵类负荷多是根据满负荷工作需要来选型,实际应用中大部分时间并非工作于满负荷状态,由于交流电动机调速很困难,常用挡风板、回流阀或启/停机时间来调节风量或流量。同时大电动机在工频状态下频繁启/停比较困难,电流冲击较大,势必造成电能损耗和启/停机时的电流冲击。采用变频器直接控制风机、泵类负荷是一种最科学的控制方法。以风机水泵为例,根据流体力学原理,轴功率与转速的三次方成正比。当所需风量减少,风机转速降低时,其功率按转速的三次方下降。除去机械损耗、电动机铜损、铁损等影响,节能效率也接近 40%。同时也可以实现闭环恒压控制,节能效率将进一步提高。由于变频器可实现大的电动机的软停、软启,避免了启动时的电流冲击,减少了电动机的故障率,延长使用寿命,同时也降低了对电网的容量要求和无功损耗,因此为达到节能目的,推广使用变频器已成为各地节能工作部门以及各单位节能工作的重点。

以 U/f 控制和转差频率控制为代表的通用变频器,具有控制电路结构简单、成本较低,机械特性硬度较好,能够满足一般传动的平滑调速要求等特点,已在工业生产的各个领域得到广泛应用。这种控制方式在低频时,由于输出电压较小,受定子电阻压降的影响比较显著,故造成输出最大转矩减小。另外,其机械特性终究没有直流电动机硬,动态转矩能力和静态调速性能都还不尽如人意,系统性能不高、控制曲线会随负荷的变化而变化,转矩响应慢、电动机转矩利用率不高,低速时因定子电阻和逆变器死区效应的存在而性能下降,稳定性变差等。

在许多对调速要求不高的电气传动中,仍有大量的异步电动机变极调速、绕线电动机转子串电阻调速、绕线电动机串级调速、异步电动机定子调压调速、电磁转差离合器调速等电气调速系统在使用。例如,由于系统简单和价格低廉,现在大量使用的各类起重机仍采用绕线电动机转子串电阻调速系统。

2. 高性能交流调速系统

U/f 恒定、速度开环控制的通用变频调速系统和转差频率速度闭环控制系统,基本上解决了异步电动机平滑调速的问题。然而,当生产机械对调速系统的动静态性能提出更高要求时,上述系统还是比直流调速系统略逊一筹。原因在于,其系统控制的规律是从异步电动机稳态等效电路和稳态转矩公式出发推导出稳态值控制,完全不考虑过渡过程,系统在稳定性、启动及低速时转矩动态响应等方面的性能尚不能令人满意。

考虑到异步电动机是一个多变量、强耦合、非线性的时变参数系统,很难直接通过外加信号准确控制电磁转矩,但若以转子磁通这一旋转的空间矢量为参考坐标,利用从静止坐标系到旋转坐标系之间的变换,则可以把定子电流中励磁电流分量与转矩电流分量变成标量独立开来,进行分别控制。这样,通过坐标变换重建的电动机模型就可等效为一台直流电动机,从而可像直流电动机那样进行快速的转矩和磁通控制即矢量控制。

和矢量控制不同,直接转矩控制摒弃了解耦的思想,取消了旋转坐标变换,简单地通过检测电动机定子电压和电流,借助瞬时空间矢量理论计算电动机的磁链和转矩,并根据与给定值比较所得差值,实现磁链和转矩的直接控制。

尽管矢量控制与直接转矩控制使交流调速系统的性能有了较大地提升,但是还有许多领域有待进一步研究。

- (1) 磁通的准确估计或观测。
- (2) 无速度传感器的控制方法。
- (3) 电动机参数的在线辨识。
- (4) 极低转速包括零速下的电动机控制。
- (5) 电压重构与死区补偿策略。
- (6) 多电平逆变器的高性能控制策略。

3. 高压、大容量、高转速的交流调速系统

目前,世界上的高压变频器不像低压变频器那样具有成熟的一致性的主电路拓扑结构,而是限于功率器件的电压耐量和高压使用条件的矛盾,国内外各变频器生产厂商,采用不同的功率器件和不同的主电路结构,以适应各种拖动设备的要求,因而在各项性能指标和适用范围上也各有差异。

根据有无直流环节而将高压变频器分为两大类。

- (1) 无直流环节的变频器,即交—交变频器。

(2) 有直流环节的变频器称为交—直—交变频器。其中直流环节采用大电感以平抑电流脉动的变频器称为电流源型变频器;直流环节采用大电容以抑制电压波动的变频器则称为电压源型变频器。

电流源型变频器又可以分为负荷换向式(晶闸管)变频器(LCI)和采用自关断器件(GTO或SGCT)的变频器。

电压源型变频器则可以分为功率器件串联二电平直接高压变频器、采用IGCT或HV-IGBT的三电平变频器和采用LV-IGBT的单元串联多电平变频器。

高压变频技术正处于发展阶段,还没有达到像低压变频器那样成熟。限于功率器件的特性和具体拖动系统的要求,而开发出了各种类型的变频器,它们各有优缺点,不能一概而论哪一种变频器好与不好。选型时应根据供电电网及拖动对象的特点来定,不必一味追求某种

指标。如起重设备、机车牵引、船舶主传动要选用可四象限运行的变频器，对于轧钢机则要选择动态响应能力好和过载能力强的变频器，对于低速运行的设备可选用交—交变频器，而对于高速运行的设备则可选用负荷换流加同步电动机的方式，或者选用电流源型变频器。单元串联多电平变频器只能用在风机水泵调速节能的场合。双馈交流变频调速系统的变频器功率小、功率因数可调、系统可靠性较高，因此近来受到了许多研究人员的重视。由于变频器的功率只占电动机容量的 25%，因此可以大幅度降低系统的成本。但是，双馈交流变频调速系统中的电动机需要专门设计，不能使用普通的异步电动机；而且受变频器容量和调速范围的限制，不具备软启动的能力。

目前，研究较多的高压、大功率逆变电路有多电平电压型逆变器、变压器耦合的多脉冲逆变器、交—交变频器和双馈交流变频调速系统等。

各种常用交流电气调速方式的一般性能及特点见表 1-3。

表 1-3 各种常用交流电气调速方式的一般性能及特点

调速方式	调速性质	调速范围	响应能力	节电效果	初始投资	主要特点及适用范围
变极调速	有级	2~4 挡 变速	快	良	低	具有较硬的机械特性，稳定性良好；无转差损耗，效率高；接线简单、控制方便、价格低；有级调速，级差较大，不能获得平滑调速。适用于不需要无级调速的生产机械，如金属切削机床、升降机、起重设备、风机、水泵等
绕线转子异步电动机串电阻	有级	≤ 10	差	低	低	绕线转子异步电动机串入附加电阻，使电动机的转差率加大，电动机在较低的转速下运行。串入的电阻越大，电动机的转速越低。此方法设备简单，控制方便，但转差功率以发热的形式消耗在电阻上。属有级调速，机械特性较软，大量应用于各种普通起重机
串级调速	无级	≤ 10	快	优	中	可将调速过程中的转差损耗回馈到电网或生产机械上，效率较高；装置容量与调速范围成正比，投资省，适用于调速范围在额定转速的 70%~90% 的生产机械上；调速装置故障时可以切换至全速运行，避免停产；晶闸管串级调速功率因数偏低，谐波影响较大。适合于风机、水泵及轧钢机、矿井提升机、挤压机上使用
定子调压	无级	≤ 5	快	中	较低	调压调速线路简单，易实现自动控制；调压过程中转差功率以发热形式消耗在电动机转子电阻中，效率较低。一般适用于 100kW 以下的生产机械简单调速
电磁离合器	无级	≤ 10	较快	中	较高	装置结构及控制线路简单、运行可靠、维修方便；调速平滑、无级调速；对电网无谐波影响；高速区调速特性软，低速区效率比较低。适用于中、小功率，要求平滑调速、短时低速运行的生产机械
变频调速	无级	≤ 100	快	良	高	效率高，应用范围广，可用于普通笼型异步电动机；调速范围大，特性硬，精度高；技术复杂，造价高，是目前最为理想的高性能交流调速系统。适用于要求精度高、调速性能好、高效节能的应用场合

第二节 变频器的发展

一、交流变频调速技术的发展过程

变频技术是应交流电动机无级调速的需要而诞生的。从 20 世纪 60 年代后半期开始,电力电子器件从 SCR (晶闸管)、GTO (门极可关断晶闸管)、BJT (双极型功率晶体管)、MOSFET (金属氧化物场效应管)、SIT (静电感应晶体管)、SITH (静电感应晶闸管)、MCT (MOS 控制晶闸管) 发展到今天的 IGBT (绝缘栅双极型晶体管)、HVIGBT (耐高压绝缘栅双极型晶闸管), 器件的更新促使电力变换技术的不断发展。20 世纪 70 年代开始, 脉宽调制变压变频技术 (PWM-VVVF) 研究引起了人们的高度重视。20 世纪 80 年代, 作为变频技术核心的 PWM 模式优化问题吸引着人们的浓厚兴趣, 并得出诸多优化模式, 其中以鞍形波 PWM 模式效果最佳。再加上 20 世纪 70 年代以后微电子技术日新月异的发展, 超大规模集成电路的应用, 用于电动机控制的各种专用微处理器件, 不但功能越来越强大, 而且体积也越来越小, 集成度和可靠性进一步提高。从 20 世纪 80 年代后半期开始, 美、日、德、英等发达国家的 VVVF 通用变频器已投入市场并得到广泛应用。

VVVF 变频器的控制相对简单, 机械特性硬度也较好, 能够满足一般传动的平滑调速要求, 已在产业的各个领域得到广泛应用。但是, 这种控制方式在低频时由于输出电压较小, 受定子电阻压降的影响比较显著, 故造成输出最大转矩减小。另外, 其机械特性终究没有直流电动机硬, 动态转矩能力和静态调速性能都还不尽如人意, 因此人们又研究出矢量控制变频调速。

矢量控制, 也称磁场定向控制。它是 20 世纪 70 年代初由德意志联邦共和国 F. Blasschke 等人首先提出, 以直流电动机和交流电动机比较的方法分析阐述了这一原理, 由此开创了交流电动机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。但是, 由于转子磁链难以准确观测, 以及矢量变换的复杂性, 使得实际控制效果往往难以达到理论分析的效果, 这是矢量控制技术在实践上的不足。此外, 它必须直接或间接地得到转子磁链在空间上的位置才能实现定子电流解耦控制, 在这种矢量控制系统中需要配备转子位置或速度传感器, 这显然给许多应用场合带来不便。尽管如此, 矢量控制技术仍然在努力融入通用型变频器中, 1992 年开始, 德国西门子公司开发了 6SE70 通用型系列, 通过 FC、VC、SC 板可以分别实现频率控制、矢量控制、伺服控制。1994 年将该系列扩展至 315kW 以上。目前, 6SE70 系列除了 200kW 以下的价格较高, 在 200kW 以上的有很高的性价比。矢量控制方法的提出具有划时代的意义。然而在实际应用中, 由于转子磁链难以准确观测, 系统特性受电动机参数的影响较大, 且在等效直流电动机控制过程中所用矢量旋转变换较复杂, 使得实际的控制效果难以达到理想分析的结果。

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: 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动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化。这种控制方法被应用于通用变频器的设计中,是很自然的事,这种控制被称为无速度传感器直接转矩控制。然而,这种控制依赖于精确的电动机数学模型和对电动机参数的自动识别(Identification, ID),通过 ID 运行自动确立电动机实际的定子阻抗互感、饱和因素、电动机惯量等重要参数,然后根据精确的电动机模型估算出电动机的实际转矩、定子磁链和转子速度,并由磁链和转矩的 Band-Band 控制产生 PWM 信号对逆变器的开关状态进行控制。这种系统可以实现很快的转矩响应速度和很快的速度、转矩控制精度。1995 年 ABB 公司首先推出的 ACS600 直接转矩控制系列,已达到 $<2\text{ms}$ 的转矩响应速度在带 PG 时的静态速度精度 $\pm 0.01\%$,在不带 PG 的情况下即使受到输入电压的变化或负荷突变的影响,同样可以达到 $\pm 0.1\%$ 的速度控制精度。其他公司也以直接转矩控制为努力目标,如安川公司 VS-676H5 高性能无速度传感器矢量控制系列,虽与直接转矩控制还有差别,但也已做到了 100ms 的转矩响应和 $\pm 0.2\%$ (无 PG)、 $\pm 0.01\%$ (带 PG)的速度控制精度,转矩控制精度在 $\pm 3\%$ 左右。其他公司如日本富士电机公司推出的 FRN 5000G9/P9 以及最新的 FRN5000G11/P11 系列采取了类似无速度传感器控制的设计,性能有了进一步提高,然而变频器的价格并不比以前的机型贵多少。目前,该技术已成功地应用在电力机车牵引的大功率交流传动。ABB 公司推向市场的 ACS600、ACS800 系列工程型高性能变频器,工程应用效果良好。

VVVF 变频、矢量控制变频、直接转矩控制变频都是交—直—交变频的一种。其共同缺点是输入功率因数低,谐波电流大,直流回路需要大的储能电容,再生能量又不能反馈回电网,即不能进行四象限运行。为此,矩阵式交—交变频应运而生。由于矩阵式交—交变频省去了中间直流环节,从而省去了体积大、价格高的电解电容。它能实现功率因数为 1,输入电流为正弦且能四象限运行,系统的功率密度大。该技术目前虽尚未成熟,但仍吸引着众多的学者深入研究。

近 20 年来,随着电力电子技术、计算机技术、自动控制技术的迅速发展,电气传动技术面临着一场历史革命,即交流调速取代直流调速和计算机数字控制技术取代模拟控制技术已成为发展趋势。电动机交流变频调速技术是当今节电、改善工艺流程以提高产品质量和改善环境、推动技术进步的一种主要手段。变频调速以其优异的调速和启制动性能,高效率、高功率因数和明显的节电效果,广泛的适用范围及其他许多优点而被国内外公认为最有发展前途的调速方式。

电气传动控制系统通常由电动机、控制装置和信息装置三部分组成。电气传动关系到合理地使用电动机以节约电能和控制机械的运转状态(位置、速度、加速度等),实现电能—机械能的转换,达到优质、高产、低耗的目的。电气传动分成不调速和调速两大类,调速又分交流调速和直流调速两种方式。不调速电动机直接由电网供电,但随着电力电子技术的发展这类原本不调速的机械越来越多地改用调速传动以节约电能(节约 $15\%\sim 20\%$ 或更多),改善产品质量,提高产量。在我国 60% 的发电量是通过电动机消耗的,因此调速传动是一个重要行业,一直得到国家重视,目前已有一定规模。

近年来交流调速中最活跃、发展最快的就是变频调速技术。变频调速是交流调速的基础和主干内容。20 世纪变压器的出现使改变电压变得很容易,从而造就了一个庞大的电力行业。长期以来,交流电的频率一直是固定的,变频调速技术的出现使频率变为可以充分利用的资源。

目前国内主要的变频器产品状况如下。

(1) 晶闸管变流器和开关类器件 (BJT、IGBT、VDMOS) 斩波器供电的直流调速设备。这类设备的市场很大, 随着交流调速的发展, 该市场虽在缩减, 但由于我国旧设备改造任务多, 以及它在几百至一千多 kW 范围内价格比交流调速低得多, 所以在短期内市场不会大幅度缩减。国产设备能满足需要, 部分出口。自行开发的控制器多为模拟控制, 近年来主要采用进口数字控制器配国产功率装置。

(2) IGBT 或 BJT 做开关器件的 PWM 逆变器供电的交流变频调速设备。这类设备的市场很大, 总容量占的比例不大, 但台数多, 增长快, 应用范围从单机扩展到全生产线, 从简单的 U/f 控制到高性能的矢量控制。

(3) 负荷换流式电流型晶闸管逆变器供电的交流变频调速设备。这类设备在抽水蓄能电站的机组启动, 大容量风机、泵、压缩机和轧机传动方面有很大需求, 国内只有少数科研单位有能力制造, 目前容量最大做到 12MW。功率装置国内配套, 自行开发的控制装置只有模拟式的, 数字装置需进口, 自己开发应用软件。

(4) 交—交变频器供电的交流变频调速设备。这类设备在轧机和矿井卷扬传动方面有很大需求, 台数不多, 功率大, 主要靠进口, 国内只有少数科研单位有能力制造, 目前最大容量做到 7000~8000kW。功率装置部分国产, 数字控制装置进口, 包括开发应用软件。

二、国内外技术现状对比

1. 国外现状

在大功率交—交变频 (循环变流器) 调速技术方面, 法国阿尔斯通公司已能提供单机容量达 3 万 kW 的电气传动设备用于船舶推进系统。在大功率无换向器电动机变频调速技术方面, 意大利 ABB 公司提供了单机容量为 6 万 kW 的设备用于抽水蓄能电站, 德国西门子公司 Simovert S 电流型晶闸管变频调速设备单机最大容量为 14 万 kVA。在中功率变频调速技术方面, 德国西门子公司 SINAMICS GM150/SM150 系列变频调速设备单机容量为 0.6kVA~28MVA, 采用成熟可靠的高压 IGBT/IGCT 器件和三电平电压源型矢量控制技术, 其控制系统已实现全数字化, 可用于轧机、风机、水泵等大型传动。在技术成熟的小功率交流变频调速领域, 不论欧、美的中高端变频器, 还是日韩的中低端变频器, 用 IGBT 作为变流器件的变频器已形成系列产品, 并成为市场主流, 其控制系统也已实现全数字化。小功率变频器市场的竞争日益激烈, 各大厂家不断推出性能优异的新产品, 而且市场进一步细分为风机水泵、卷曲机械、提升起重机械、离心机、塑料机械、纺织机械、防爆和油田机械等专用变频器市场, 竞争的加剧也催生了新技术的开发和应用。日本三菱公司主推的 FR-F700 变频器最大单机容量可达 630kVA, 日本安川公司最近推向市场的 Varispeed G7, 在通用变频器中首次采用 “3 电平控制方式”, 用 “3 电平控制方式” 解决了冲击波问题, 可以放心地驱动现用电动机。

国外交流变频调速技术高速发展有以下特点。

(1) 市场的大量需求。随着工业自动化程度的不断提高和能源全球性短缺, 变频器越来越广泛地应用在机械、纺织、化工、造纸、冶金、食品等各个行业以及风机、水泵等的节能场合, 已取得显著的经济效益。

(2) 功率器件的发展。近年来高电压、大电流的 SCR、GTO、IGBT、IGCT 等器件的生



产以及并联、串联技术的发展应用,使高电压、大功率变频器产品的生产及应用成为现实。

(3) 控制理论和微电子技术的发展。矢量控制、磁通控制、转矩控制、模糊控制等新的控制理论为高性能的变频器提供了理论基础;16 位、32 位高速微处理器以及信号处理器(DSP)和专用集成电路(ASIC)技术的快速发展,为实现变频器高精度、多功能提供了硬件基础。

(4) 基础工业和各种制造业的高速发展,变频器相关配套硬件实现了社会化、专业化生产。

2. 国内现状

从总体上看,我国电气传动的技术水平较国际先进水平相差 10~15 年。在大功率交流电动机、无换向器电动机等变频技术方面,国内只有少数科研单位有能力制造,但在数字化及系统可靠性方面与国外还有相当大的差距。而这方面产品在诸如抽水蓄能电站机组启动及运行,大容量风机、压缩机和轧机传动、矿井提升机方面有很大需求。在中小功率变频技术方面,国内几乎所有的产品都是普通的 U/f 控制,仅有少数几个厂家推出了矢量控制变频器,品种和质量还不能满足市场需要,每年仍需大量进口。

国内交流变频调速技术产业状况如下。

(1) 变频器的整机技术落后,国内虽有很多单位投入了一定的人力、物力,但由于力量分散,并没有形成一定的技术和生产规模。变频器产品规格不完备,难以形成规模和系列,单个企业生产的品种不全。

(2) 产品的性能不稳定,技术性能、抗干扰能力、电源波动及稳定性不好。变频器噪声比较大,要控制谐波,变频设备适应恶劣环境能力差,故障率高。

(3) 变频器产品所用半导体功率器件的制造几乎是空白,对国外半导体功率器件的依赖性强,难以形成竞争优势。

(4) 相关配套产业及行业落后。

(5) 产销量少,可靠性及工艺水平不高,亟待提高。

三、变频器的发展趋势

交流变频调速技术是强弱电结合、机电一体化的综合性技术,既要处理巨大电能的转换(整流、逆变),又要处理信息的收集、变换和传输,因此它的共性技术必定分成功率和控制两大部分。前者要解决与高压大电流有关的技术问题和新型电力电子器件的应用技术问题,后者要解决(基于现代控制理论的控制策略和智能控制策略)的软、硬件开发问题(在目前状况下主要是全数字控制技术)。

通用变频器的发展趋势大致有 13 种。

1. 主控一体化

日本三菱公司将功率芯片和控制电路集成在一块芯片上的 DIPIPM(即双列直插式封装)的研制已经完成并推向市场。一种使逆变功率和控制电路达到一体化、智能化和高性能化的 HVIC(高耐压 IC)SOC(System on Chip)的概念已被用户接受,首先满足了家电市场低成本、小型化、高可靠性和易使用等要求。因此可以展望,随着功率增大,此产品在市场上极具竞争力。

2. 小型化

用日本富士(FUJI)电机公司的三添胜先生的话说,变频器的小型化就是向发热挑战。

这也就是说变频器的小型化除了出自支撑部件的实装技术和系统设计的大规模集成化外,功率器件发热的改善和冷却技术的发展已成为小型化的重要原因。小型紧凑型变频器要求功率和控制元件具有较高的集成度,其中包括智能化的功率模块、紧凑型的光耦合器、高频率的开关电源,以及采用新型电工材料制造的小体积变压器、电抗器和电容器。功率器件冷却方式的改变(如水冷、蒸发冷却和热管)对缩小装置的尺寸也很有效。ABB 公司将小型变频器定型为 Comp-ACTM,它向全球发布的全新概念是,小功率变频器应当像接触器、软启动器等电器元件一样,使用简单、安装方便、安全可靠。

3. 模块化

西门子公司在近年新推的 G120 系列通用变频器中采用了模块化的设计理念,变频器由功率模块 PM 和控制单元 CU 组成,如果要参数化、操作和监控,还可以选择基本操作面板 BOP 或者通过接口用 STARTER 调试软件来完成。不同的控制单元 CU 可以和不同的功率模块 PM 进行组合,以向用户提供适合需要的最优化驱动解决方案。

这种完全模块化的设计,使用户的应用更加灵活,这种面向未来的驱动概念,可以在同一系统中进行不断的革新。

4. 低电磁噪声、静音化

新型通用变频器除了采用高频载波方式的正弦波 SPWM 调制实现静音化外,还在通用变频器输入侧加交流电抗器或有源功率因数校正电路 APFC,而在逆变电路中采取 Soft-PWM 控制技术等,以改善输入电流波形、降低电网谐波,在抗干扰和抑制高次谐波方面符合 EMC 国际标准,实现清洁电能的变换。如三菱公司的柔性 PWM 控制技术,实现了更低噪声运行。而控制电源用的开关电源将推崇半谐振方式,这种开关控制方式在 30~50MHz 时的噪声可降低 15~20dB。

5. 专用化

新型通用变频器为更好地发挥变频调速控制技术的独特功能,并尽可能满足现场控制的需要,派生了许多专用机型,如风机水泵空调专用型、起重机专用型、恒压供水专用型、交流电梯专用型、纺织机械专用型、机械主轴传动专用型、电源再生专用型、中频驱动专用型、机车牵引专用型等。通用变频器中出现专用型家族是近年来的事,其目的是更好地发挥变频器的独特功能并尽可能地方便用户。如用于起重机负荷的 ABB 公司的 ACC800 系列,用于交流电梯的 Siemens 公司的 MICO340 系列和 FUJI 公司的 FRN5000G11UD 系列,其他还有用于恒压供水、用作机械主轴传动、电源再生、纺织、机车牵引等专用系列。

6. 系统化

通用变频器除了发展单机的数字化、智能化、多功能化外,还向集成化、系统化方向发展。如西门子公司提出的集通信、设计和数据管理三者于一体的全集成自动化(TIA)平台概念,可以使变频器、伺服装置、控制器及通信装置等集成配置,甚至自动化和驱动系统、通信和数据管理系统都可以像驱动装置通常嵌入全集成自动化系统,目的是为用户提供最佳的系统功能。

现代自动化工厂的控制与传动趋于分布式方案,这就要求智能化设备必须是模块化、分布化,并要与现代机器设备集成。这样不仅会在生产、设备调试和维护方面带来成本优势,而且为设备扩展带来高灵活性。例如,西门子公司推出的 Micromaster411 系列变频器,可将变频器移至机器设备处与电动机集成安装,这样就可降低安装和布线成本,并且便于维

护。由于变频器分布安装,这就要求变频器具有远程通信功能。据悉,丹佛斯驱动公司新近推出了防护等级为 IP66/nema 4x 的一体化分布式驱动解决方案——fcd qdrive。新产品支持墙面和轨道安装,在不使用断路器或输出接触器时,还可直接安装在电动机顶部。由于不占用机柜空间, fcd qdrive 尤其适合那些需要跨越多种标准工业网络进行总线通信的高端驱动应用,如物料装卸、包装、食品、饮料等。fcd qdrives 具备电动机自适应能力,支持能耗制动、交流制动及机械制动。其他特殊控制功能还包括闭环控制器、精确停机、速度补偿停机、计数器停机和快速启动。通信控制方面, fcd qdrives 支持 devicenet、profibus dp、as-interface 等现场总线标准,以及 fc protocol、modbus rtu、metasys n2 等串行通信标准。

目前,大多数变频器厂商推出的通用变频器都具有现场总线通信功能,一般通过外装专用的通信板选配件就可实现上位机与变频器的远程通信控制。

7. 实现高水平的控制

基于电动机和机械模型的控制策略,有矢量控制、磁通控制、直接转矩控制和机械扭矩补偿等,近年来无速度传感器矢量控制也是一个研究热点;基于现代理论的控制策略,有非线性控制、滑模变结构控制、模型参考自适应技术、参数辨识自校正控制、采用微分几何理论的非线性解耦、鲁棒观察器,在某种指标意义上的最优控制技术和逆奈奎斯特阵列设计方法等;基于智能控制思想的控制策略,有模糊控制、神经网络、遗传算法、专家系统和各种各样的自优化、自诊断技术等。变频器学术界一直以来都在研究开发满足高精度控制、算法简单、鲁棒性好的控制技术,随着新技术的工程应用,变频器的性能得到不断提高。

8. 开发清洁电能的变频器

所谓清洁电能的变频器是指变频器的功率因数为 1,网侧和负荷侧有尽可能低的谐波分量,以减少对电网的公害和电动机的转矩脉动。对中小容量变频器,提高开关频率的 PWM 控制是有效的。对于大容量变频器,在常规的开关频率下,可改变电路结构和控制方式,实现清洁电能的变换。

9. 高速数字控制

以 32 位高速微处理器为基础的数字控制模板有足够的实现各种控制算法,Windows 操作系统的引入使得用户可以灵活设计,图形编程的控制技术也有很大的发展空间。目前,普遍采用 DSP 高速数字信号处理器来完成变频器的信号处理与控制任务。

10. 网络化

新型通用变频器可提供多种兼容的通信接口,支持多种不同的通信协议,内装 RS485 接口,可由个人计算机向通用变频器输入运行命令和设定功能码数据等,通过选件可与现场总线 Profibus-DP、Interbus-S、Device Net、Modbus plus、CC-Link、LonWorks、Ethernet、CAN open、T-LINK 等通信。如西门子、ABB、VACON、施耐德、富士、日立、三菱、普传、台安、东洋公司等生产的通用变频器,均可通过各自可提供的选件支持上述几种或全部类型的现场总线。

11. 易于使用的模式

新型通用变频器机内固化的调试指南会引导用户一步一步地填入调试表格,无需记住任何参数,充分体现了易操作性。如西门子公司新一代 Micromaster420/440 因采用了一种称为易于使用的成功概念,使得在连接技术、安装和调试方面的操作变得非常简单。