

通用变频器

选型与维修技术



王仁祥 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

通用变频器

选型与维修技术

ISBN 7-5083-1897-8



9 787508 318974 >

ISBN 7-5083-1897-8

定价： 41.00 元

华北水利水电学院图书馆



208292471

TN773

W320

通用变频器 选型与维修技术



王仁祥 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

829247

内 容 提 要

本书详细介绍了通用变频器的基本结构原理、功能特性、故障诊断、电磁兼容性、选型、运行与维护技术；通用变频器网络通信技术、通信原理及现场总线技术基础知识；高压变频器的基本结构原理及应用技术。介绍了西门子、ABB、Vacon、富士、丹佛斯、三菱、台安、三星、日立、施耐德最新系列通用变频器的主要技术特点及应用。书中列举了大量的应用实例，阐述了通用变频器的选型、应用、故障诊断、运行维护、网络通信及编程技术等。全书密切联系实际，侧重于实际工程应用。

本书可供电气工程、自动化工程、工业网络控制技术各领域的工程技术人员阅读及用作培训教材，亦可供相关专业的高等院校、中等专业学校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

通用变频器选型与维修技术/王仁祥编著. - 北京: 中国电力出版社, 2004
ISBN 7-5083-1897-8

I. 通… II. 王… III. ①变频器 - 选型 ②变频器 - 维修 IV. TM773

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 108157 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>)
北京密云红光印刷厂印刷
各地新华书店经售

2004 年 4 月第一版 2004 年 4 月北京第一次印刷
787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 26.25 印张 628 千字
印数 0001—4000 册 定价 41.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前言

现在如果有人给你一份手刻油印资料,你会觉得不可思议,可早在10年前,大约1990年前后,笔者正潜心研究通用变频器的理论及实现的方法,曾为得到一份手刻油印的HEF4752和EPS101资料兴奋不已,记得市场上能见到的SANKEN—SVF系列、FUJI—FVRG5/P5系列通用变频器多是以美元报价的,市场上的产品资料也是影印件,实验室里买了一台SANKEN—SVF—4.5kW变频器,还被列为精密仪器类精心管理,目前虽还摆在那里,但早已无人问津了。现在市场上生产、销售通用变频器的国内外公司、厂商铺天盖地,产品品牌、品种达几百种,性能各异,市场竞争十分激烈,价格一降再降,有的价格低得会让你产生许多怀疑。几乎世界上所有知名的电气公司、厂商都有通用变频器品牌在中国销售。我国自行设计、生产通用变频器的公司、厂商也达几十家,有些品牌还大量出口。虽然,通用变频器在我国作为商品销售,才是近10年的事,在较多领域里推广应用也只不过是最近三五年的时间,甚至是刚刚接触到,但发展十分迅速,应用范围广泛,销售额逐年增加,每年大约有超过数十亿元人民币的市场。如果单从应用水平来看,目前我国已成为通用变频器应用大国,应用水准与发达国家也已相差无几,在工业自动化技术应用方面取得可喜的成绩,并给我国的工业自动化事业带来了深刻的变革,产生了巨大的社会效益,其中有的技术已接近或达到世界先进水平,但是,在通用变频器技术的普及应用方面,与发达国家的水平相比尚有很大差距。据统计,目前,我国在用的交流电动机使用通用变频器调速运行的仅有10%左右,而工业发达国家已达60%~70%;日本在风机、水泵上采用通用变频器调速已达10%,而我国还不足0.1%;在日本,70%的空调器已采用了变频调速,而我国才刚刚起步。欧美及日本等变频技术先进的国家,均称已进入“变频时代”。

通用变频器传动已成为实现工业自动化的主要手段之一,在各种生产机械中,如风机、水泵、生产线、机床、纺织机械、塑料机械、造纸机械、食品机械、石化设备、工程机械、矿山机械、钢铁机械等有着广泛的应用,可以提高自动化水平、提高机械性能、提高生产效率、提高产品质量和节能等等。其中,重要的技术特征是可以充分地与现代网络技术结合,发挥智能控制的优势,实现分布式网络控制系统,是工业企业自动化的重要发展方向,并已有一些很好的范例。实践证明,通用变频器在各行各业中的各种设备上应用,已成为当今节电、改造传统工业、改善工艺流程、提高生产过程自动化水平、提高产品质量、改善环境、推动技术进步的主要手段之一,是国民经济和日常生活中普遍需要的新技术,也是国际上技术更新换代最快的领域之一,在国际上称其为绿色技术。

工业自动化主要包括单机系统自动化、工业生产过程自动化和管理自动化等三个方面,目前正向着网络化方向发展。现代工业自动化的核心是生产过程信息化、网络化,呈现开放性、智能性和分布控制网络化的特点。在现代工业自动化中,计算机控制技术充当了极为重要的角色,它是计算机技术、控制理论和网络技术有机的结合,它的有力的支持者就是可通信智能化设备,包括可编程序控制器、通用变频器及智能化仪器仪表和传感器等,它们为计

计算机技术在工业自动化方面的应用提供了坚实的舞台，而通用变频器是其中的重要角色之一。通用变频器的现代控制理论与技术的应用、全数字化控制技术、网络通信技术等的迅速发展，在分布式控制系统中担任了极其重要的角色，这也是通用变频器技术日新月异地发展的基础，特别是在网络化控制技术方面起到了举足轻重的作用，目前网络控制技术取代单机控制已成为现实，现代交流电动机的传动控制已不再仅局限于单一的调速控制要求，而更多的是要求装置化、系统化、网络化应用，以获得更强的控制功能。因此，当今的变频调速控制技术已成为高科技领域的综合性技术之一，交流电动机网络控制技术的发展是当代变频调速控制技术发展的核心技术，在现代工业自动化控制系统中，通用变频器通过可编程序控制器或工业计算机与工厂管理系统相结合，与生产线控制系统及现场设备一起构成一个多级分布式控制系统。从这个现实出发，现在我们讨论交流电动机变频调速技术就不能不与计算机控制技术和网络控制技术，尤其是与现场总线及其通信技术紧密相联系，这也是本书写作过程中重要考虑的内容之一，并以相当篇幅详细地介绍了通用变频器的通信功能及通信网络技术，并列举了一些实例及编程技术，由于其与现场总线紧密相联系，所以也较详细地介绍了现场总线的基础知识。

目前市面上的通用变频器产品品牌、种类越来越多，不同公司的产品各有特点，使用起来差异较大，尤其是在设计选型方面，面对众多的品牌和功能参数往往难以轻易定论，在售后服务和维修方面也有许多不便和困难。通用变频器控制系统终究是一个技术密集、比较复杂、规模较大、一次性投资大的项目。如果不能做到胸有成竹，不预先弄清楚它的技术要点，就匆匆下手，就难免造成不必要的损失。目前关于专门介绍通用变频器的著作不少，这些著作对在我国迅速推广普及应用通用变频器技术起到了功不可灭的作用，作者也从中受益匪浅，本书将试图从通用变频器应用技术的角度出发，比较全面地反映目前通用变频器的最新技术及应用，给广大读者在选型及维修技术方面提供一定的参考资料，另外，作者经常深入到生产现场，深知读者需要什么内容的著作，本书正是在这一背景下编写的，一旦出版面世亦请多多指教为盼。

在编写过程中受到了许多厂商的大力支持，寄来了详尽的产品资料，在此深表感谢。国内市场上的通用变频器产品有近百个品牌，近千个系列。根据本书编写的目的，选择了其中具有一定特点、在技术上具有代表性与先进性、在国内有一定影响力的、能体现不同技术层次特点的几个品牌产品给予介绍，对它们的通用技术并不过多地叙述，并无意涉及理论研究方面的内容，如果需要的话，读者可以参考本书提供的参考文献，这样，本书通篇看来自然就像是一台具有最新技术的通用变频器的介绍，具有普遍性。这样处理会使读者居高临下地了解和掌握通用变频器技术，而不会有高不可攀的感觉。另外，作者将一些应用技术分散在相应的技术要点处，而不是集中叙述，这样更接近现场，这也是本书写作的特点之一。本书中提供了较多的关于通用变频器核心控制部件及系统方面的资料，如微处理器及数字信号处理器（DSP）等，这些对于维修参考和深入了解通用变频器技术十分有益。

本书内容具有下列特点：①内容切合工程实际、取材先进、新颖；②联系工程实际，引入学科交叉内容，介绍一些新思想、新方法和新技术；③较系统地论述了通用变频器的应用技术，尤其是通用变频器网络通信技术及现场总线技术的基础知识，符合现代工业自动化技术发展的需求；④着重从工程实际应用出发，突出理论联系实际，具有面向广大工程技术人员的特点，因而具有很强的工程性、实用性；⑤技术内容较多地取自于产品说明书，因而具

有内容系统、结构合理、深入浅出、便于工程应用。

本书编写过程中曾参考和引用了国内外许多专家、学者最新发表的论文、著作，以及一些产品的说明书，由于各种因素不能一一预告、面谢，作者在此一并致谢。同时感谢青岛大学刘湘波同志、上海交通大学王小曼同志，对全部书稿进行了逐字逐句的审查，提出了详细的审稿意见，在校稿、打字、绘图等工作中作了大量工作，给予了热情的帮助、支持和启迪。

由于作者水平及时间所限，书中难免存在错误和不妥，热忱欢迎广大读者批评指正，将不胜感谢。

编 者

目 录



前言

绪论	1
第 1 章 通用变频器应用与选型技术基础	13
1.1 交流电动机变频调速的基本理论	13
1.1.1 生产机械的运行方程	13
1.1.2 异步电动机的机械特性	15
1.1.3 生产机械的负载特性	18
1.2 变频调速时的机械负载特性	20
1.2.1 变频调速时电动机的转矩特性	21
1.2.2 通用变频器驱动恒转矩负载	22
1.2.3 通用变频器驱动降转矩负载	24
1.2.4 通用变频器驱动恒功率负载	25
1.2.5 通用变频器驱动四象限运行的负载	26
1.2.6 通用变频器驱动张力控制类负载	28
1.2.7 通用变频器驱动高速运转的负载	29
1.2.8 通用变频器驱动大起动转矩负载	29
1.2.9 通用变频器驱动多分部（单元）速度协调类负载	30
1.2.10 通用变频器驱动宽调速类负载	30
1.2.11 通用变频器驱动大惯性负载	30
1.2.12 通用变频器驱动脉动转矩负载	30
1.2.13 单相异步电动机的特性	31
1.2.14 无刷直流电动机的特性	32
1.2.15 开关磁阻电动机	32
1.2.16 变频器专用电动机	34
1.3 通用变频器的基本结构原理	34
1.3.1 通用变频器的基本控制原理	35
1.3.2 通用变频器的分类	40
1.3.3 通用变频器的基本结构原理	44
1.4 通用变频器中的电力电子器件	56
1.4.1 电力半导体开关器件的分类	56

1.4.2	常用电力半导体开关器件简介	58
1.4.3	IGBT 模块的驱动电路	68
1.4.4	智能功率集成电路 (SPIC) 及其驱动电路	74
1.4.5	IGBT 模块和智能功率模块 IPM 的选用	84
1.5	通用变频器中的控制电路	87
1.5.1	通用变频器中常用芯片简介	89
1.5.2	通用变频器中的 8XC196Mx 微处理器	92
1.5.3	通用变频器中的数字信号处理器 DSP	101
1.5.4	通用变频器中的 AD2S100 矢量控制处理器	107
1.5.5	M37704 在通用变频器中的应用	110
1.5.6	80C196MC 微处理器在通用变频器中的应用实例	111

第 2 章 通用变频器选型与应用设计基础 **117**

2.1	通用变频器选型基础	117
2.1.1	产品样本的规格指标	118
2.1.2	根据变频调速控制系统的控制方式选择通用变频器	122
2.1.3	根据不同的负载类型选择通用变频器	122
2.1.4	通用变频器的选型依据和方法	130
2.1.5	变频控制柜的设计原则	140
2.1.6	通用变频器使用要点	143
2.2	通用变频器的功能与设定	145
2.2.1	通用变频器的外部接口电路	145
2.2.2	通用变频器的主要控制功能	148
2.2.3	通用变频器的参数设定实例	157
2.3	通用变频器调速系统电动机容量的选择	161
2.3.1	典型负载的计算	161
2.3.2	三种负载特性变频调速的设计要点	164
2.3.3	选定电动机时的注意事项	165
2.4	通用变频器应用中的电磁兼容性	167
2.4.1	概述	167
2.4.2	通用变频器的谐波抑制	174
2.4.3	通用变频器外部干扰的抑制	176
2.4.4	通用变频器内部干扰的抑制	179
2.4.5	通用变频器的电磁兼容性设计	181
2.4.6	EMC 标准与测试	191
2.4.7	谐波干扰故障处理实例	195
2.5	通用变频器选型与应用中的若干问题	196
2.5.1	通用变频器控制方式的选择中的问题	197

2.5.2	通用变频器用于控制特殊电动机与机械设备中的问题	199
2.5.3	特殊情况下通用变频器的应用问题	200
2.5.4	通用变频器的电磁干扰与安全运行的问题	202
2.5.5	关于通用变频器的参数设定问题	204
第3章	通用变频器产品简介	206
3.1	概述	206
3.2	通用变频器的标准技术规范	207
3.2.1	通用变频器的型号、铭牌数据	207
3.2.2	额定输入、输出参数	208
3.2.3	控制参数	209
3.2.4	显示功能及类型	210
3.2.5	保护特性参数	210
3.2.6	环境参数	211
3.3	西门子通用变频器	211
3.3.1	西门子标准系列通用变频器概述	211
3.3.2	MM 420 通用变频器	219
3.3.3	MM 440 矢量控制通用变频器	243
3.3.4	MM Eco & MD Eco 通用变频器	248
3.3.5	西门子 USS 通信协议与应用	257
3.3.6	西门子 PLC 与通用变频器间的通信	262
3.3.7	用 Visual Basic6.0 编制通用变频器串行通信控制程序	267
3.4	ABB 通用变频器	270
3.4.1	概述	270
3.4.2	Comp—AC™通用变频器	273
3.4.3	ACS600 系列通用变频器	279
3.4.4	ACS800 系列通用变频器	281
3.5	Vacon 通用变频器	282
3.5.1	Vacon 系列通用变频器的主要特征	284
3.5.2	Vacon 系列通用变频器的应用举例	287
3.6	富士通用变频器	289
3.6.1	富士通用变频器的主要特征	290
3.6.2	富士 FRENIC5000G11S/P11S 系列通用变频器性能概述	291
3.6.3	富士 FVR—E11S 系列通用变频器性能概述	294
3.6.4	富士通用变频器的通信	295
3.7	丹佛斯通用变频器	306
3.7.1	丹佛斯通用变频器简介	306
3.7.2	VLT 系列通用变频器应用简介	309

3.8 三菱通用变频器	323
3.8.1 三菱通用变频器简介	323
3.8.2 FR—F500 风机水泵专用型通用变频器应用简介	327
3.9 台安通用变频器	340
3.10 三垦通用变频器	342
3.10.1 三垦系列通用变频器简介	343
3.10.2 SAMCO—vm05 系列通用变频器的应用实例	349
3.10.3 利用 Windows API 函数编制通用变频器串行通信控制程序	352
3.11 日立通用变频器	356
3.12 施耐德通用变频器	360
 第 4 章 通用变频器的故障分析与维护保养	 367
4.1 通用变频器故障的行为率曲线	367
4.2 通用变频器技术服务的基本方法	369
4.2.1 技术服务的内容和程序	370
4.2.2 通用变频器的主要故障类型	371
4.2.3 通用变频器主要部件的故障分析	374
4.2.4 通用变频器控制系统中的电力电缆及其电磁兼容性	376
4.2.5 通用变频器控制系统中的接地	377
4.3 通用变频器的维护保养	379
4.3.1 日常检查和定期检查	381
4.3.2 通用变频器的基本检测和测量方法	384
4.3.3 异步电动机的日常检查测量	387
4.4 通用变频器控制系统故障诊断	389
4.4.1 通用变频器控制系统常见故障分析	390
4.4.2 通用变频器控制系统中常见问题	401
4.4.3 通用变频器故障维修实例	404
4.4.4 通用变频器载波频率与其他各量的关系	407
 参考文献	 409

结 论

通用变频器是指可以应用于通用交流电动机调速控制的变频器，特点是具有通用性，并具有智能化特征，“通用变频器”也因此而得名。由于通用变频器强调通用性，不但从控制思想上有其内在的通用性能，同时也将现场经验和应用技巧不断地融入控制策略中，使其功能不断地得到充实和加强，智能化的特征也越来越明显。最近，ABB 集团向全球交流传动领域里发布了一个“部件传动”——Comp—AC™的新理念，它认为：小功率通用变频器作为一种产品，应当像普通开关电器，如接触器、继电器等一样，具有使用简单、方便、安全可靠的基本性能。遵循 Comp—AC™的理念，用户完成一项传动任务应当非常简单，只要按照所提供的简明示意图和安全操作指南，可以很快地将变频器投入使用；在选型或确定技术方案时，如果需要，会即刻得到相关的技术解决方案、适合的产品选型资料和技术支持。新型的通用变频器还增加了友好的图形化用户界面、引导式调试步骤、参数趋势图形和多种通信协议，提供与上位机通信的接口，可方便地通过 RS232/RS485 等串行通信接口和现场总线构成网络。所有这些都充分体现了当代通用变频器的技术水平和发展方向。

交流电动机变频调速是利用交流电动机的同步转速随频率变化的特性，通过改变交流电动机的供电频率进行调速的方法。通用变频器和交流电动机相结合，实现对生产机械的传动控制称为变频器传动，属运动控制范畴。变频器传动具有综合性的技术优势，应用到不同的场合，可以体现出不同的功能，达到不同的目的，收到令人满意的效果。如在风机、水泵中应用可以提高控制性能，大幅度节电；应用在各种生产机械，如工程机械、纺织机械、塑料机械、造纸机械、食品机械等中，可以提高机械性能、提高生产效率和产品质量等。实践证明，在异步电动机的诸多调速方法中，变频调速的性能最好，它调速范围大、稳定性好、可靠性高、运行效率高和高的功率因数及节电效果，有着广泛的应用范围和可观的社会、经济效益，所以，通用变频器能在各行各业中的各种设备上迅速普及应用，已成为当今节电、改造传统工业、改善工艺流程、提高生产过程自动化水平、提高产品质量、改善环境、推动技术进步的主要手段之一。它以其优异的性能和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绿色技术，是国民经济和日常生活中普遍需要的新技术，也是国际上技术更新换代最快的领域之一。

随着电力电子器件制造、基于电力电子电路的电力变换、计算机、现代控制、微电子、全数字化控制、网络通信等技术的迅速发展，通用变频器技术也日新月异。特别是通用变频器的全数字化、网络化控制技术，在提高其性能方面起到了举足轻重的作用，从而使电气传动控制技术也发生了深刻的历史性变革，如交流调速取代直流调速、全数字化控制技术取代



模拟控制技术、网络控制技术取代单机控制已成为现实，现代交流电动机传动控制已不再仅局限于单一的调速控制要求，而更多地是要求装置化、系统化应用，重要的是要求转矩控制、控制精度，以获得更强的控制性能。变频调速控制技术是高科技领域的综合性技术，交流电动机控制技术的发展是变频调速控制技术发展的基础。新一代的变频调速控制技术是基于正弦波脉宽调制（SPWM）技术、矢量变换技术、直接转矩控制和网络通信技术为基础的全数字化控制技术。微处理器技术、PWM 控制技术和电力电子开关器件是通用变频器控制技术的基础。可以说，电力电子器件的更新换代，促使了电力变换技术的不断发展，通用变频器控制技术的发展完全得益于微处理器技术、PWM 控制技术和电力电子开关器件的发展。

自从 1991 年 INTEL 公司推出 8X196Mx 系列芯片以来，8X196KB、8X196KC、8X196MC 等在通用变频器中应用广泛，专门用于电动机控制的芯片在品种、性能、处理速度、控制功能、性能价格比等方面也都有很大的发展。如日本 NEC 的 PD78366 微处理器、三菱电机公司的 M37704、M37705 单片机、日立公司的 SH7000 系列微处理器等。由于交流电动机控制理论不断发展，控制策略和控制算法也日益复杂。扩展卡尔曼滤波、FFT、状态观测器、自适应控制、人工神经网络等均应用到了通用变频器控制策略中，因此，数字信号处理器（DSP）芯片在全数字化的高性能通用变频器中被广泛应用，如美国德州仪器的 TMS320C240 DSP 等都是颇具代表性的产品。最近 TI 公司推出的 MCS320F240X 系列产品将价格降低到了单片机的水平，从而使得在较短时期内，全数字化进程就由 8 位 CPU 发展到 16、32 位乃至双 CPU 占主流。目前，并行运算的 32 位 DSP，与 16 位 CPU 相比较，运算速度提高了近 50 倍。采用模拟控制方式所不能想象的控制功能，在各种软件的支持下轻而易举地实现了，并且能够在 Windows 95/98/NT 平台下编程、交换数据，使通用变频器的性能不断提高，功能不断充实、增强、实用。新型通用变频器已经实现了转矩控制功能，具有无跳闸能力，由这种变频器驱动的通用异步电动机已经具备了挖土机特性，像直流电动机一样，可以人为地设定其极限输出转矩，零速时的起动转矩可以达到额定转矩的 200%；如日立、富士公司采用动态转矩矢量控制方法，可达到在 0.5Hz 附近 200% 的转矩，甚至更高。微处理器适时快速地完成复杂的控制算法，使矢量控制、直接转矩控制通用变频器的实用化成为现实，并使异步电动机控制系统在动态性能方面已经赶上或超过了直流调速系统。值得一提的是，在通用变频器全数字化过程中，各种总线也扮演了相当重要的角色，如 STD 总线、工业 PC 总线、现场总线等。

1. 通用变频器的发展

（1）通用变频器技术的原型。1964 年德国人 A.Schonung 和 H.stemmler 首先在《BBC 评论》上提出把通信技术中的脉宽调制（Pulse Width Modulation）PWM 技术应用到交流传动中，从此，自 20 世纪 70 年代初，对 PWM 调速技术的研究引起了人们的高度重视，到 20 世纪 80 年代初，日本学者提出了基于磁通轨迹的磁通轨迹控制方法，该方法以三相波形的整体生成效果为前提，以逼近电动机气隙的理想圆形旋转磁场轨迹为目的，一次生成两相调制波形，使变压变频（Variable Voltage Variable Frequency）VVVF 技术（又称为 U/f 方式）成为变频调速技术的核心，此后，人们着力于 PWM 模式的优化问题的研究，并得出诸多的优化模式，进一步活跃了变频调速技术的发展。这个时期的通用变频器的基本原理是以生成三相交流正弦波形的效果为前提，采用逼近电动机气隙的旋转磁场轨迹的方法，生成基于磁通轨迹的电



压空间矢量（或称磁通轨迹法）和调制波形，以达到调压调频的目的。这种方法后来被称为电压空间矢量控制。从 20 世纪 80 年代后半期开始，美、日、德、英等发达国家的基于 VVVF 技术的通用变频器已商品化并广泛应用。今天看来，VVVF 变频器的原理和控制方法相对简单，机械特性硬度也较好，能够满足一般交流电动机的无级调速要求，但是，这种控制方式在低频运行时，由于受电动机定子电阻压降的影响比较显著，输出最大转矩受到限制，降低了机械特性硬度，使动态转矩能力和调速性能还不能满足更多的需求，这也促使人们致力于研究新的方法。虽然这个时期的变频器还不尽人意，但比较适合应用在风机、水泵等以节能为目的的调速场合，因此通用变频器在这一领域迅速得到普及应用，可以说，上述情况就是通用变频器的原型。这一时期的典型产品属于普通功能型 U/f 控制方式通用变频器，不具有转矩控制功能。如 1990 年前后进入中国市场的日本富士公司的 RN500G5/P5、FVR 与 FRNG7/P7，系列日本三菱公司的 SVF、MF 系列，德国西门子公司 MM 系列等。新型 U/f 控制方式通用变频器在新型电力电子器件的支持下，融入了新的算法、控制技术和功能，在性能方面已有很大改进，低频性能大大提高，并具备自寻优运行功能，节电效果更好，已能满足一般工业控制的需求。如台湾普传公司的省电王 Pi168F 系列风机、水泵、空调专用通用变频器，除具有一般变频器的通用功能外，还具有节能功率因数控制、管路故障监测和防水锤效应曲线等功能。节能功率因数控制功能是一种节能省电模式的功能，可以提高系统的功率因数，降低无功损耗，以 37kW/380V 风机负载为例：无节能功率因数控制功能时，在 30Hz 时电动机侧的电流为 25A，而省电王在相同运转情况下只有 8.5A，节能效果是相当显著的。

(2) 矢量控制通用变频器。1968 年德国人哈斯 (Hasse) 博士首先提出了磁场定向控制 (Field Orientation) 理论，1971 年德国人伯拉斯切克 (F. Blaschke) 以专利文献的形式提出了异步电动机转子磁场定向矢量控制的方法，并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，使人们了解到，尽管交流电动机电磁关系复杂，但同样可以实现转矩、磁场分别控制的方法。该理论提出对磁链和电磁转矩分别采用闭环控制，实现电流和磁场的解耦，进一步实现转子磁场定向矢量控制，使异步电动机的控制特性将和他励直流电动机特性相似，从而使异步电动机的调速控制理论前进了一大步。这种系统可以实现很快的转矩响应速度和很高的速度、转矩控制精度，但需依赖于精确的电动机数学模型和对电动机参数的自动辨识，通过自动辨识确立电动机实际的定子阻抗、饱和因数、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，并由磁链和转矩的控制产生 PWM 信号对逆变器的开关状态进行控制。至 1980 年，德国人 Leonhard 等在应用微处理器的矢量控制研究中取得了进展，促进了矢量控制技术的实用化。此后，日本厂商竞相研究矢量控制技术，并在产品性能和价格两个方面取得进展，理论界则应用现代控制理论把矢量控制的理论进一步深化，开拓了解耦控制、速度观测、参数自适应、无速度传感器矢量控制等方面的理论成果。在实用化方面，人们经过进一步分析研究发现，对于一般的异步电动机调速控制系统，可以采用较简单的转子磁场定向矢量控制，即通常说的转差频率矢量控制，显然这是对转子磁链定向控制方法的近似。转差频率矢量控制又分为电流型转差频率矢量控制和电压型转差频率矢量控制。转差频率矢量控制使异步电动机的动态特性控制方面有了长足的进展，这也是矢量控制型通用变频器的理论基础。

通用矢量控制型变频器的基本理论是“派克 (Park) 变换”，基本原理是将异步电动机



在三相坐标系下的定子电流 I_a 、 I_b 、 I_c ，通过三相/两相变换，将其等效成两相静止坐标系下的交流电流，再通过按转子磁场定向旋转变换，等效成同步旋转坐标系下的直流电流 I_m 、 I_u （ I_m 模拟直流电动机的励磁电流； I_u ，模拟与转矩成正比的电枢电流），然后仿造直流电动机的控制方法，求得电动机的控制量，再经过相应的坐标反变换，实现对异步电动机的参量控制。由此可见，矢量控制的特征是控制转子磁链，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，再经过坐标变换实现正交或解耦控制，显然，转子磁链是很难准确观测的，它必须直接或间接地得到转子磁链在空间上的位置，才能实现准确的定子电流解耦控制，在这种矢量控制系统中需要配置转子位置或速度传感器，这在众多应用场合上不太现实。随着现代控制理论的发展和数字信号处理器（DSP）在通用变频器中的应用，上述问题得到了很好的解决，“只用电动机三根线控制”成为现实，即现在所说的无速度传感器矢量控制通用变频器。

自 1992 年开始，德国西门子公司相继开发了 6SE70 系列通用变频器，通过 FC、VC、SC 板可以分别实现频率控制、矢量控制、伺服控制等，至 1994 年该系列通用变频器的容量就扩展至 315kW 以上。这一时期的典型产品属于高性能型 U/f 控制方式通用变频器，具有转矩控制功能和无跳闸能力，输出静态转矩特性较普通型 U/f 控制方式通用变频器有很大改进，机械特性硬度高于工频电网供电的异步电动机。在此基础上进一步发展的高性能型矢量控制通用变频器，在动态性能方面有了很大提高，具备了挖土机特性，目前该系列通用变频器的容量已扩展到 4000kW。富士电机公司新开发的“高性能转矩计算功能”、转矩矢量控制，是在各种运行条件下，根据负载状态实时计算转矩，使异步电动机能最大限度地输出转矩、最适当地控制电压、电流矢量，大大提高了低速领域的计算精度和速度。目前应用最多的还是高性能型 U/f 控制方式通用变频器，这类变频器的性能足以满足大多数生产机械高质量调速控制的需要，只有在特殊应用场合才考虑选用高性能型矢量控制通用变频器，市场上已有众多的品牌可供选择。

(3) 直接转矩控制通用变频器。直接转矩控制（Direct Torque Control, DTC），英文有的也称为 Direct self control (DSC)，直译为直接自控制，这种“直接自控制”的思想以转矩为中心来进行综合控制，不仅控制转矩，也用于磁链量的控制和磁链自控制。直接转矩控制与矢量控制的区别是：它不是通过控制电流、磁链等量间接控制转矩，而是把转矩直接作为被控量控制，其实质是用空间矢量的分析方法，以定子磁场定向方式，对定子磁链和电磁转矩进行直接控制的。1985 年德国鲁尔大学的狄普布洛克（M. Depenbrock）教授首先提出了基于六边形乃至圆形磁链轨迹的直接转矩控制理论，他称为 Direct self control (DSC)。这种方法不需要复杂的坐标变换，而是直接在电动机定子坐标上计算磁链的模和转矩的大小，并通过磁链和转矩的直接跟踪，实现脉宽调制和系统的高动态性能。

直接转矩控制的特征是控制定子磁链，是直接在定子静止坐标系下，以空间矢量概念，通过检测到的定子电压、电流，直接在定子坐标系下计算与控制电动机的磁链和转矩，获得转矩的高动态性能。它不需要将交流电动机等效为直流电动机，因而省去了矢量变换中的许多复杂计算，它也不需要模仿直流电动机的控制，从而也不需要为解耦而简化交流电动机的数学模型，而只需关心电磁转矩的大小，因此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得到磁链模型，并方便地估算出同步速度信息，同时也很容易得到转矩模型，磁链模型和转矩模型构成了完整的电动机模型，因而能方



便地实现无速度传感器控制，如果在系统中再设置转速调节器，即可进一步得到高性能动态转矩控制了。需要说明的是，直接转矩控制的逆变器采用不同的开关器件，控制方法也有所不同。Depenbrock 最初提出的直接自控制理论，主要在高压、大功率且开关频率较低的逆变器控制中广泛应用。目前被应用于通用变频器的控制方法是一种改进的、适合于高开关频率逆变器的方法。1995 年 ABB 公司首先推出的直接转矩控制通用变频器，目前已成为其各系列通用变频器的核心技术，动态转矩响应已达到小于 2ms，在带速度传感器时的静态速度精度达 $\pm 0.001\%$ ，在不带速度传感器的情况下即使受到输入电压的变化或负载突变的影响，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，如富士电机公司的 FRENIC5000VG7S 系列高性能无速度传感器矢量控制通用变频器，虽与直接转矩控制方式还有差别，但它也已做到了速度控制精度 $\pm 0.005\%$ 、速度响应 100Hz、电流响应 800Hz 和转矩控制精度 $\pm 3\%$ （带 PG）。日本三菱、日立，芬兰 VASON 等公司最新的系列产品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。

2. 通用变频器相关技术的发展

(1) 关于功率器件。自 20 世纪 60 年代后半期开始，电力电子开关器件经历了普通晶闸管 (SCR)、^① 门极关断晶闸管 (GTO)、^② 双极型功率晶体管 (GTR 或 BJT)、金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET)、静电感应晶体管 SIT、静电感应晶闸管 (SITH)、MOS 控制晶体管 (MCT)、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)、耐高压绝缘栅双极型晶体管 (HVIGBT)、复合功率模块或智能功率模块 (Intelligent Power Module, IPM) 的发展过程，这些开关器件不断地更新换代，促使了电力变换技术的不断发展。变频器技术的发展就是建立在这些技术基础之上的。在交流电动机的传动控制中，应用最多的功率开关器件有 SCR、GTO、GTR、IGBT 以及智能功率模块 (IPM)，其中，IGBT 及 IPM 是集 GTR 的低饱和电压特性和 MOSFET 的高频开关特性于一体，是目前通用变频器中最广泛使用的功率开关器件。IGBT 集电极-发射极电压 U_{ce} 小于 3V，开关频率可达到 20kHz，内含的集电极-发射极间超高速二极管的 t_{rr} 可达 150ns，1992 年前后开始在通用变频器中得到应用，并持续向开关损耗更低、开关速度更快、耐压更高、容量更大方向发展，目前已达到单只耐压 4kV、电流 1200A 的水平，目前第四代 IGBT 采用沟道型栅极技术、非穿通技术等方法，大幅度降低了集电极-发射极间的饱和电压 $U_{CE(sat)}$ ，使通用变频器的性能有了很大的提高，具体体现在以下几个方面：

- 1) 由于 IGBT 的发热减少，将曾占主回路发热 50% ~ 70% 的器件发热降低了 30% 以上。
- 2) 由于 IGBT 开关速度快，可采用高频载波控制，载波频率达到 10 ~ 20kHz，超过了人耳的感受范围，即可实现电动机的静音化运行，并使输出电流波形有明显改善。
- 3) 由于 IGBT 的驱动功率减少，装置体积明显缩小。

智能功率模块 (IPM) 内包含了 IGBT 芯片及外围的驱动电路和保护电路，有的还集成了霍尔传感器和光耦合器。日本三菱电机公司最近开发的专用智能功率模块 (ASIPM) 就不需要外接光耦合器，通过内部自举电路可单电源供电，并采用了低电感封装技术，在实现系统小型化、专用化、高性能、低成本方面又推进了一步。日立公司开发的通用变频器专用集

① 晶闸管为 Thyristor，但为方便起见沿用 SCR。

② GTO 只代表门极关断，但为方便，往往用 GTO 代表全称。



成功率模块 (ISPM), 将整流电路、逆变电路、逻辑控制、驱动和保护、电源回路全部集成在一个模块内, 通用变频器整体的元器件数量比原来减少了 40% 以上。因此智能功率模块 (IPM) 是一种高度集成型功率开关器件, 目前, 模块的最大额定电流可达 600A, 小型通用变频器基本上是采用 IPM 作为主电路, 采用 IPM 后的综合性能大大提高, 其性能价格比已超过 IGBT, 有很好的经济性。除此之外, 其优点是:

- 1) 开关速度快, 驱动电流小, 控制、驱动电路简单。
- 2) 内含电流传感器, 可以高效迅速地检测出过电流和短路电流, 能对功率芯片给予足够的保护, 故障率大大降低。
- 3) 由于在器件内部电源电路和驱动电路的配线设计上做到优化, 所以浪涌电压、门极振荡、噪声引起的干扰等问题有效得到了控制, 可靠性很高。

智能功率模块 (IPM) 除了在通用变频器中被大量采用之外, 经济型的 IPM 开始在一些家用电器, 如变频空调、变频冰箱、变频洗衣机中得到广泛应用。

(2) 关于脉宽调制 (PWM) 技术。PWM 技术是通用变频器的控制核心, 任何控制算法的最终实现几乎都是以各种 PWM 控制方式完成的。在 20 世纪 70 年代开始至 80 年代初, 由于当时大功率晶体管主要为双极性达林顿晶体管, 载波频率一般最高不超过 5kHz, 电动机绕组的电磁噪声及谐波引起的振动引起人们的关注, 为求得改善, PWM 控制技术一直是人们研究的热点。随着以 IGBT 为代表的高速功率开关技术的发展, PWM 控制技术进一步成为人们研究的热点, 关于 PWM 控制技术的文章在很多著名的电力国际会议上, 如 PESC、IECON、EPE 年会上已形成专题。尤其是微处理器应用于 PWM 控制技术并使之数字化以后, 从最初追求电压波形的正弦, 到电流波形的正弦, 再到磁通的正弦; 从效率最优、转矩脉动最少、再到消除噪声等, PWM 控制技术经历了从最初采用模拟电路产生正弦波脉宽调制 (SPWM) 信号以控制功率开关器件开始, 到目前采用全数字化实时在线的软件化 SPWM 信号的发展过程, 期间形成了包括电压、电流或磁通的以正弦波为目标的各种 PWM 方案的不断创新和完善的过程。目前还有新的方案不断提出, 进一步证明这项技术的研究方兴未艾。其中, 空间矢量 PWM 技术以其电压利用率高、控制算法简单、电流谐波小等特点在通用变频器中得到了越来越多的应用。

由于高频载波方式的 SPWM 追求的是实现电流谐波最小、电压利用率最高、效率最优及转矩脉动最小等优化目标, 所以它有可以同时实现变频、变压、抑制谐波的特点, 并可通过调整载波频率而减弱或消除机械和电磁噪声, 因此在通用变频器乃至其他能量变换系统中得到广泛应用, 据称日本三菱电机公司创造的 Soft-PWM 方式, 可以从根本上减少噪声的产生, 并能减少射频干扰噪声。旨在改善输出电压、电流波形, 降低电源系统谐波的多重 PWM 控制技术在大功率变频器中发挥了其独特的优势, 如 ABB 公司的 ACS1000 系列变频器和美国罗宾康公司的完美无谐波系列高压变频器等。

(3) 通用变频器的新技术。

1) 模块化。新型通用变频器的模块化已经取得了很大进展, 如日立公司的通用变频器专用集成功率模块 (ISPM), 将整流电路、逆变电路、逻辑控制、驱动和保护、电源回路全部集成在一个模块内, 使整机的元器件数量比原来减少了 40% 以上, 可靠性得到很大提高。

2) 专用化。新型通用变频器为更好地发挥其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、注塑机专用型、电梯专用型、

