

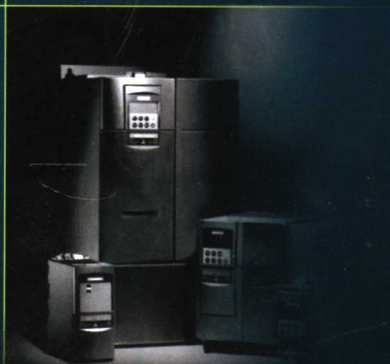
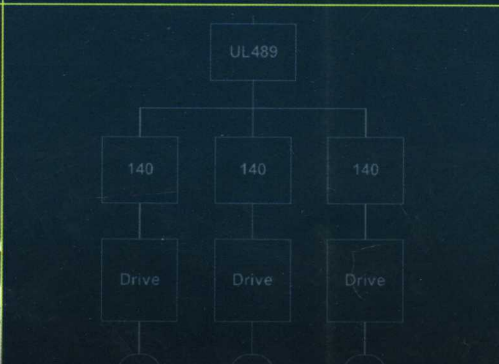
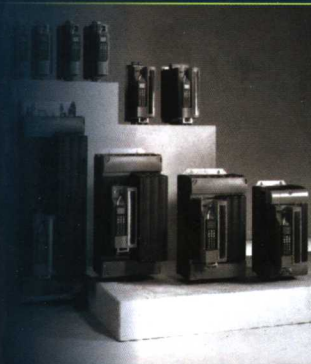
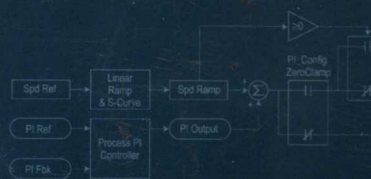
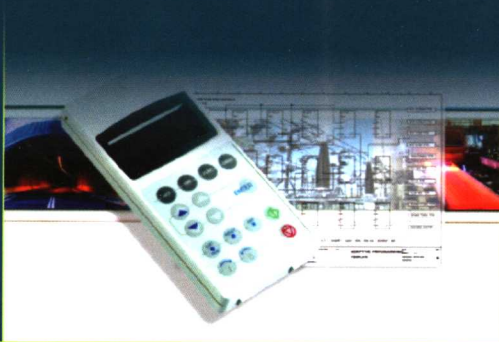
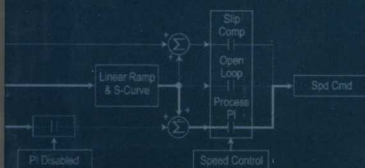
# Inverter

## Principle and Application Guide

# 变频器

## 原理及应用指南

吴忠智 吴加林 编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 变频器 原理及应用指南

吴忠智 吴加林 编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书从电力电子半导体器件的特性及开关作用,所实行的各种变换,使频率发生变化产生的整流——交-直(AC-DC)、交-交(AC-AC)、交-直-交(AC-DC-AC)、直-交(DC-AC,又叫逆变)的基本原理谈起,介绍了各种形式的变频电源——整流器、逆变器、变频器的拓扑电路、动作原理、功能特点,以及它们在太阳能及风力发电,高压直流输电 HVDC,电动机车、舰船、电动汽车等节能绿色交通工具,各类电动机(异步、同步、绕线、变频、无刷、开关磁阻等)中的应用指南。同时对在应用中如何处理电磁干扰,谐波对电网、电动机的影响,如何做到电磁兼容遵守标准规范作了分析介绍。

本书可为企事业单位的电气技术人员了解变频器原理,以及选用和应用变频器提供参考,也可作为各大专院校及变频器节能培训班的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

变频器原理及应用指南/吴忠智,吴加林编著. —北京:  
中国电力出版社, 2007  
ISBN 978-7-5083-5911-3

I. 变… II. ①吴…②吴… III. 变频器-基本知识  
IV. TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 103185 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2007 年 9 月第一版 2007 年 9 月北京第一次印刷  
1000 毫米×1400 毫米 B5 开本 18.75 印张 379 千字  
印数 0001—4000 册 定价 30.00 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



**吴忠智** 教授级高工，生于1933年，1955年四川大学工学院电机系毕业。毕业后先后在电子工业部第十、第十一设计研究院从事自动化、电磁兼容、变频器应用设计研究工作，任自动化室主任。1982、1984年两次赴美国考察访问学习，并成为国际电气电子工程师学会（IEEE）高级会员。1997~1998年在美国参与EMC标准的修订。工作期间担任四川省委、省政府第一届科技顾问成员。获四川省科技先进个人、绵阳市政府军转民先进工作者。专著7本，中英文论文80余篇，获四川省科协优秀论文奖。拥有十几项专利，多次通过技术转让扶持中小民营企业，发展民族经济。退休后担任成都佳灵电气制造有限公司总工、电子科技大学博士生论文同行专家评定导师。



**吴加林** 高级工程师，生于1953年，大学毕业。中国变频技术开拓者，享受政府津贴的变频技术专家，中国优秀民营企业家，成都佳灵电气制造有限公司CEO。多项国家火炬计划项目及国家重点创新项目的负责人。在中（高）压变频器领域有突破性的研究，拥有二十多项专利，在国内外发表论文数十篇，专著多本。2007年位居中国变频器十大风云人物榜首。

# preface 前 言

节能是我国经济和社会发展的一项长远战略方针，也是当前极为紧迫的一项任务。为推动全社会开展节能降耗，缓解能源瓶颈制约，建设节能型社会，促进经济社会可持续发展，实现全面建设小康社会的宏伟目标，国家发展和改革委员会提出了如下目标：

项 目	年 份	
	2000 年	2010 年
燃煤工业锅炉（运行）	65%	70%~80%
中小电动机（设计）	87%	90%~92%
风机（设计）	75%	80%~85%
泵（设计）	75%~80%	83%~87%
气体压缩机（设计）	75%	80%~84%
汽车（乘用车）平均油耗	9.5L/百 km	8.2~6.7L/百 km
房间空调器（能效比）	2.4%	3.2%~4%
电冰箱（能效指数）	80%	62%~50%
家用燃气灶（热效率）	55%	60%~65%
家用燃气热水器（热效率）	80%	90%~95%

而目前我国与其他国家的能耗差距在于单位产值能耗。据有关机构研究，2000年按现行汇率计算的每百万美元国内生产总值能耗，我国为1274t标准煤，比世界平均水平高2.4倍，比美国、欧盟、日本、印度分别高2.5倍、4.9倍、8.7倍和0.43倍。2000年，电力、钢铁、有色、石化、建材、化工、轻工、纺织8个行业主要产品单位能耗平均比国际先进水平高40%，如火电供电煤耗高22.5%，大中型钢铁企业吨钢可比能耗高21.4%，铜冶炼综合能耗高65%，水泥综合能耗高45.3%，大型合成氨综合能耗高31.2%，纸和纸板综合能耗高120%。2000年，燃煤工业锅炉平均运行效率在65%左右，比国际先进水平低15%~20%；中小电动机平均效率87%，风机、水泵平均设计效率75%，均比国际先进水平低5%，系统运行效率低近20%；机动车燃油经济性水平比欧洲低25%，比日本低20%，比美国整体水平低10%；载货汽车百吨公里油耗7.6L，比国外先进水平高1倍以上；内河运输船舶油耗比国外先进水平高10%~20%。我国各类电动机总容量约4.2亿kW，实际运行效率比国外低10%~30%，用电量约占全国用电量的60%。

“十一五”期间重点推广高效节能电动机、稀土永磁电动机；在煤炭、电力、有色、石化等行业实施高效节能风机、水泵、压缩机系统优化改造，推广变频调速、自动化系统控制技术，使运行效率提高2%，年节电200亿kWh照明用电，约占全国用电量的13%，高效节能荧光灯与普通白炽灯之比为1:2.6，用高效节能荧光灯替代白炽灯可节电70%~80%，用电子镇流器替代传统电感镇流器可节电20%~30%，交通信号灯由发光二极管(LED)替代白炽灯，可节电90%。“十一五”期间节能重点是在公用设施、宾馆、商厦、写字楼、体育场馆、民用建筑中推广高效节电。

为了顺应国家政策的号召，更好地推广变频节能技术，中国电力出版社特约我们编写本书。本书阐述变频器的变频原理，提供各种应用方案。内容从电力电子半导体器件的特性及开关作用，所实行的各种变换，使频率发生变化产生的整流—交—直(AC-DC)、交—交(AC-AC)、交—直—交(AC-DC-AC)、直—交(DC-AC，又叫逆变)的基本原理谈起，介绍了各种形式的变频电源——整流器、逆变器、变频器的拓扑电路、动作原理、功能特点，以及它们在太阳能及风力发电，高压直流输电HVDC，电动机车、舰船、电动汽车等节能绿色交通工具，各类电动机(异步、同步、绕线、变频、无刷、开关磁阻等)中的应用指南，同时对在应用中如何处理电磁干扰，谐波对电网、电动机的影响，如何做到电磁兼容遵守标准规范作了分析介绍。

本书由吴忠智、吴加林合作编写。我们曾于1995年合作编写《变频器应用手册》，又于2000年合作编写了《调速用变频器及配套设备选用指南》。北京中瑞电子系统工程设计院的赵立丰院长组织了本书的编写工作。我们根据过去的编写经验、读者的需求，以及多年的生产应用技术和经验，国际、国内会议交流的经验，以及在走访IEEE后取得的第一手资料编写了本书。

本书在编写过程中，一直得到北京中瑞电子系统工程设计院总设计师雇问、教授级高工谭玉珍，北京中瑞电子系统工程设计院副院长、高级工程师吴晓卫二人的精心关怀和帮助，美国IOWA大学教授吴跃进、美国麻省理工学院在校生吴耘济提供了宝贵的最新资料，使我们得以在北京顺利地完成这一著作。对他们的无私付出，在此谨致以最衷心的感谢！

由于变频技术是一门正在发展的技术、又是交叉学科，编者知识技术水平有限，本书有很多不足之处，希望广大读者批评指正。

**吴忠智 吴加林**



2007年8月于北京

# contents 目 录

前 言	
■ 第 1 章 总论	1
1.1 变频器概述	1
1.2 调速变频电源的发展	7
1.3 静止变频电源的发展	12
■ 第 2 章 变频器基本原理	15
2.1 电压型与电流型主回路控制方式	16
2.2 电压控制与电流控制	19
2.3 PAM 与 PWM	20
2.4 脉宽调制的几种方法	21
2.5 变频器四象限运行	24
2.6 多重化变频器	29
■ 第 3 章 电力电子半导体器件	35
3.1 电力二极管	35
3.2 晶闸管	38
3.3 晶体管	54
3.4 功率集成电路 PIC	67
3.5 电力电子器件的比较	70
■ 第 4 章 AD-DC 整流器	72
4.1 三相半波整流器	72
4.2 6 脉波整流器	74
4.3 带自耦变压器的双星整流器	75
4.4 三相全波整流器 (Graetz 桥)	77
4.5 半控桥整流器	79
4.6 整流器的换相及功率因数	79
4.7 谐波及其控制策略	82
■ 第 5 章 交-交变频器	88
5.1 交-交变频工作原理及运行方式	88
5.2 交-交变频器主电路形式	91
5.3 强迫换相交-交变频器	94

5.4	矩阵交-交变频器 (MC)	95
5.5	矩形电压波交-交变频器	96
5.6	正弦电压波交-交变频器	99
5.7	正弦电流波交-交变频器	100
<b>第 6 章</b>	<b>交-交变频电压控制及软起动器</b>	<b>105</b>
6.1	单相交-交电压控制器	105
6.2	三相交-交电压调压控制器	109
6.3	调压调速的功率损耗及优缺点	113
6.4	软起动器	114
<b>第 7 章</b>	<b>变频静止电源</b>	<b>119</b>
7.1	半桥式电压源逆变器	119
7.2	半桥式电压源逆变器加热电源	122
7.3	全桥式电压源逆变器	124
7.4	全桥式电压源逆变器加热电源	126
7.5	IGBT 串联逆变器加热电源	128
7.6	IGBT 并联逆变器加热电源	129
7.7	MOSFET 高频加热电源	131
7.8	SIT 高频加热电源	132
<b>第 8 章</b>	<b>可再生能源用变频电源</b>	<b>134</b>
8.1	光电原理及光电池	134
8.2	储能电池及充放电	136
8.3	光电源供电系统	137
8.4	与电网连接的三相电压源逆变器	143
8.5	功率控制器	148
8.6	风力电源系统	150
<b>第 9 章</b>	<b>高压直流输电 (HVDC) 用变频器</b>	<b>157</b>
9.1	交流输电与直流输电的比较	160
9.2	HVDC 系统的类型	161
9.3	HVDC 换流站整流器	162
9.4	HVDC 换流站逆变器	171
9.5	高压直流输电系统 HVDC 实例	176
<b>第 10 章</b>	<b>交-直-交调速用变频器</b>	<b>181</b>
10.1	交-直-交电流源型变频器	181
10.2	多电平交-直-交电压源型变频器	190
10.3	多脉波、多电平交-直-交电压源型变频器	204
10.4	多重化功率单元变频器	208



10.5	直接串联 IGBT、IGCT 变频器	217
10.6	中小容量交-直-交电电压源型通用变频器	222
10.7	智能型变频器	226
10.8	高功率因数变频器	229
10.9	风机、水泵用节能型变频器	230
10.10	能量回馈式变频器	231
10.11	变频空调用变频器	232
10.12	单相电容分相式电动机变频器	236
	<b>第 11 章 电动机车、舰船、电动汽车用变频器</b>	240
11.1	电动机车用变频器	240
11.2	舰船用变频器	247
11.3	电动汽车用变频器	252
	<b>第 12 章 变频器在传动调速系统中应用指南</b>	262
12.1	传动系统对变频器的要求	262
12.2	负载的类型和特性	264
12.3	直流电动机调速传动	270
12.4	笼型异步电动机调速传动	271
12.5	绕线转子异步电动机调速传动	273
12.6	同步电动机调速传动	274
12.7	无刷直流电动机 (BDCM) 调速传动	275
12.8	开关磁阻电动机 (SRM) 调速传动	276
12.9	直线电动机调速传动	276
12.10	步进电动机调速传动	277
12.11	执行机构位置控制	278
12.12	集成电动机调速传动	278
12.13	低压变频器的比较	278
12.14	中压变频器直接串联元件与其他拓扑电路比较	279
12.15	中压变频器二电平与多电平的比较	284
12.16	变频器对电动机控制方式的比较	285
12.17	调速用变频器的不利因素	286
12.18	抑制电磁干扰的措施 EMC	288
	<b>参考文献</b>	290



## 1.1 变频器概述

变频器是电力电子科学的具体体现,电力电子(Power Electronics)科学是研究利用电力电子半导体器件的通断作用来实现电力电能大功率的变换及控制的电子电路装置。即电力回路实现电子化。首先是把交流变换为直流,开始于 20 世纪初汞弧整流器的发明。真正的革命开始于 1956 年贝尔实验室发明 SCR,当时称为可控硅,后改称为不可关断晶闸管。1958 年通用电气公司推出商品化的可控硅产品。从此把过去只是在低电压微电流小功率的无线电回路中应用而扩大到电力回路,可控硅的出现使得电子技术用于电力的主回路中,当时人们称为工业电子学,后才改称电力电子学,就是在大电流电力主回路可以实行电子化。变频器比电力电子更为具体化,它就是利用半导体器件的通断作用来实现电能频率变化的电子控制装置。把 50 或 60Hz 的交流电源利用半导体器件的通断作用变为任意频率的交流电源,或变为频率为零的直流电源,后者称之为整流,再将直流利用半导体器的通断作用逆变为任意频率任意电压的交流。所谓通断作用是普通的一个开关,由机械触头构成,可以接通或断开电源。如同一个灯泡用一个普通的开关来接通或断开。不过现在不是用开关而是用半导体器件。利用半导体器件的通断无机触头、无电弧,省了很多麻烦之事。把频率为零的直流电源通过电力电子半导体器件的通断作用变换成某一频率的交流电源,通常叫做逆变。变换成某一频率交流电源有两种情况:①是变换成一定的频率一定的电压 CVCF(Constant Voltage constant Frequency,) 额定值是固定的,这种可作为各种静止电源;②是变换成频率可变、电压也可变的 VVVF(Variation Voltage 变频调速电源,变频器类型见图 1-1)。

### 1.1.1 变频器的核心是电力电子器件及控制方式

#### 1. 电力电子器件

电力电子技术研究的是电力电子器件在电路中的通断作用所实现的各种变换,变频器就是这种变换装置,因此它随着逆变元件的发展而发展。逆变元件所承受的通断电流和额定电压决定了它的通断能力;在通断过程中损耗大小,如饱和压降和开关损耗这决定变频器的效率和体积大小;开关损耗与开关频率有关;开关频率与噪声有关,而且与输出电压电流波形有关。这就是说电力电子器件要朝着电压高、电流大、开关频率高、导通电阻小的方向发展。

晶闸管半控器件,属于第一代产品虽然历史悠久,但调制频率低、控制复杂、效率低、容量大、电压高。该器件用作整流还是用作逆变,都是比较成熟的。

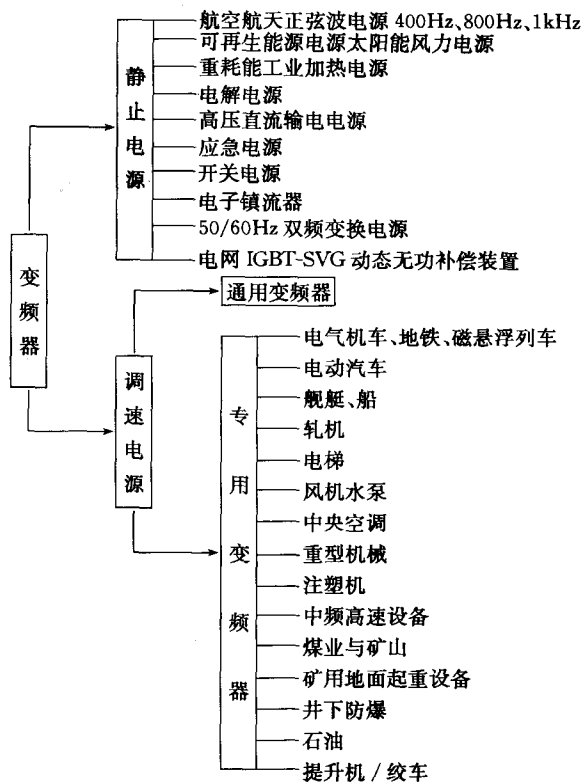


图 1-1 变频器按用途分类

全控器件 GTO 和 BJT，不管是组装直流斩波器还是组装变频器，GTO 在电力机车上的应用具有垄断性。这也是我国“八五”期间组织攻关的重大科研课题。但是将 GTO 变频器用于其他地方，争议较大，原因是 GTO 的关断电流增益太小，过电流保护比较困难，调制频率低。用 BJT 组装的直流斩波器和 PWM 变频器十分流行，但输出电压不超过 460V，容量不超过 400kW。BJT 是靠电流驱动，功耗大，调制频率也不高，噪声大，不如 MOSFET 的电压驱动简单、可靠。但后者容量更小，输出电压也更低，在市场上有竞争力的产品并不多。

在变频器中，新一代的电力电子器件是 IGBT 和 MCT。前者是 MOS 驱动 BJT，优点是容量和电压都超过了 BJT，有取而代之的趋势；后者 MOS 驱动晶闸管，理论上具有两者的优点。这两种新型元件都有成熟的产品，IGBT 已发展到第四代，而且目前国外正在将微电子的生产工艺向电力电子转移，于是产生了 SPIC 电路。把 IGBT 的驱动电路和保护电路复合在一起的智能器件叫 IPM，还有把开关电源复合在一起的 IPM，这样使变频器更加可靠，已经成为调速的主导产品，将取代直流调速，21 世纪将是交流调速时代。

## 2. 控制方式

变频器用不同的控制方式，得到的调速性能、特性及用途是不同的。控制方式大体分为开环控制和闭环控制。开环控制有  $U/f$  电压与频率成正比例的控制方式；闭环有转差频率控制和各种矢量控制。从发展历史来看也是从开环到闭环，如今的矢量控制可以实现与直流机电枢电流控制相媲美。现在还可直接取交流电动机参数进行直接转矩控制，这样控制就方便准确，精度高。

### 1.1.2 变频器的技术发展动向

#### 1. 最新技术动向

由于变频器适用领域不断扩大，所采用技术也不断拓宽。以下将分别对主回路、控制回路、传感器、多功能化、小型化、系统化等方面分别叙述。

(1) 主回路的最新技术。为追求变频器的小型化，人们费尽心机，可以说主要是不断和减少元器件的发热作斗争。现在主回路中占发热量 50%~70% 的 IGBT 的损耗已大幅度减少，由于用了漏极—控制极新技术，使集电极—射极间的饱和电压 ( $U_{CEsat}$ ) 大为降低，从而开发出第四代 IGBT。采用这种新器件损耗低，主回路模块可做到小型、低价且保护功能完善，为目前普遍应用的 IPM (Intelligent Power Module)。

此外，为降低电动机产生的噪声，常把开关频率提高到 10~15kHz，但由此亦带来负面影响，即对附近的机器产生电磁干扰。解决的办法是降低开关时电压脉冲的  $du/dt$ ，一般通过驱动电路技术将此值限制在 500V/ $\mu$ s 以下。变频器中的另一个噪声源是由于控制电源采用 DC/DC 整流器而产生的。若改用半谐振电路可得到满意结果。图 1-2 表示采用新电路后发射电磁噪声数据与原有电路的比较。由图可

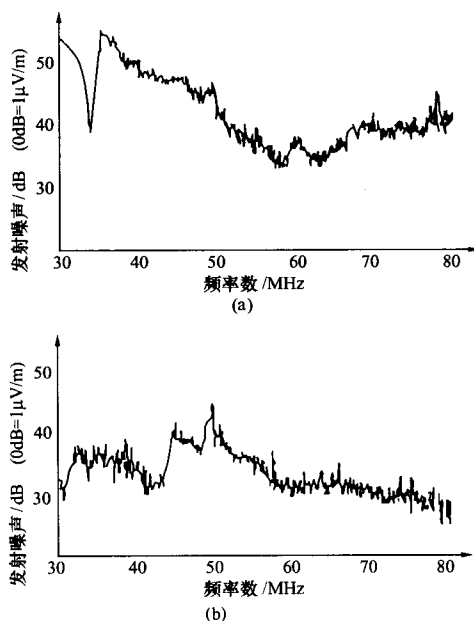


图 1-2 采用新电路后发射电磁噪声数据与原有电路的比较

(a) 原有方式；(b) 新方式

见在频带为 30~50MHz 范围内,可降低 15~20dB。

对主回路的再一个要求是对输入侧高次谐波电流的限制。一般通用变频器的电源侧多用不控二极管整流器,电流输入端将会产生高次谐波电流。为此,各国都规定了限制高次谐波规范,使人们对限制高次谐波入网的必要性有更进一步认识。一些变频器(含简易型变频器在内的变频器)产品装备了经济型的限制高次谐波部件,即如图 1-3 所示的直流电抗器接线端子。采取各种措施使功率因数增加到 1,达到主回路高效。

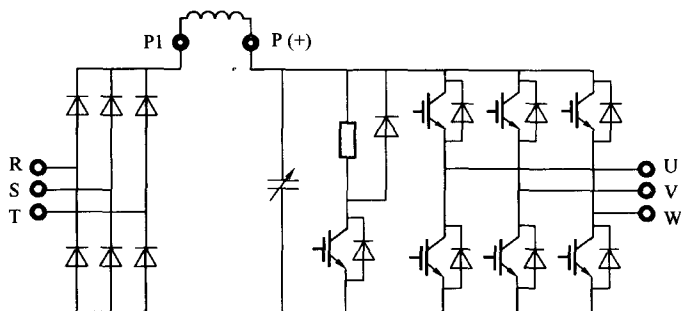


图 1-3 通用变频器的主回路

(2) 最新的控制技术。通用变频器现在在高速响应、高性能方面,也提出了高的指标,以满足新产品开发的需求。实现控制高速化的主要动力之一是微处理器的高性能化。几十年前在变频器上用 16 位微机就认为控制速度够高了,现在一般是用 32 位微机,被称为 RISC (Reduced Instruction Set Computer),其处理速度大大提高,控制运算处理的速度几乎提高 2 倍以上。在伺服控制变频器上,过去多用软件处理的运算已用 ASIC (Appilcation Specific IC) 等的硬件处理来代替。这样控制周期将加快 10 倍,使整个控制系统的响应速度大大加快,大约提高 5 倍的响应速度。

由控制方式可见,即使普通的通用变频器也进入了矢量控制的新时代。在高功能的一类机型中只要用户选购一种备用电路板,可使通用变频器变成一个带速度传感器 PG (Pulse Generator) 的矢量控制变频器。因此,可以说现在已进入提供低价、高性能的矢量控制变频器的新时代。

矢量控制的控制性能与驱动电动机在运行中的参数能否正确把握有很大关系。故在矢量控制变频器上应增设参数自调整功能。除了在设备停转的离线情况下自检测外,尚须具有在运行中由于温度变化在线测出电动机参数改变的自调整功能。

伺服控制型变频器除上述自调整功能外,尚需实时检测负荷惯量的技术,结合负荷求得一种最佳的控制响应。

在通用变频器上已开发出一种独特的力矩矢量控制方式以改善控制性能。但若用于极低速运转范围内其力矩的运算精度尚有待提高,其原因是由于磁滞损耗引起

的铁损未进行补偿,若充分考虑此因素会提高低速的控制性能。低速区的另一问题是低速时速度不均匀不稳定问题,其原因是由于输出电压的波形畸变未得到补偿。以上问题解决后,变频器的低速性能会得到明显改进。

图 1-4 一台 3.7kW 电动机采用变频调速,在 1Hz 空载运行时转速不均匀的测量数据。由图可见在波形中高于工作频率 6 倍的不稳定成分大大降低。

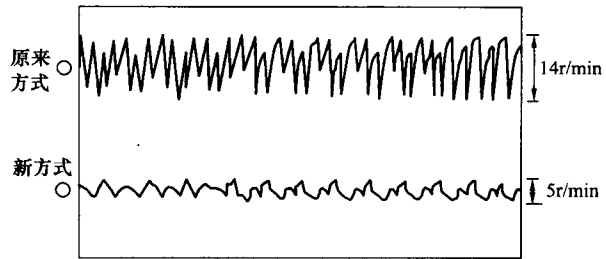


图 1-4 采用变频调速的 3.7kW 电动机转速不均匀的测量数据 (1Hz, 空载时)

(3) 最新的传感器技术。对于伺服控制变频器,为进行高速运算处理达到高精度控制,选用合适的

旋转位置传感器是十分重要的,往往由于它而影响系统的整体性能。一般这种传感器采用高分辨率的数字编码器,多用 16 位的编码器。随着分辨率即编码器位数的增高,编码发送器和伺服系统放大器之间的配线根数增加。新的做法是将原来信号的并行传送方式改为串行传送。

(4) 高功能化、多功能及智能化技术。近来市场对变频器功能的要求是尽可能减少些设备,用软件实现多功能及智能化技术。新的机械成套装备,往往采用多台变频器,人们担心由于一台变频器故障而使整台设备停止运转。为了避免这种不良后果,要求在每台变频器开动前都要仔细的做好检查保养工作。新开发的变频器可以事先对电容容量,总运行时间和环境湿度进行测定,综合评估后预告该部件的寿命。

对于大惯性负载起停的特殊功能开发主要是,当瞬时停电后再起动或者由于外部风力作用于叶片上,变频器再起动时都要求无冲击的平滑起动。为此,变频器应附加起动的特殊控制环节,即设定适当的正反馈自励振荡,以此振荡频率来推算电动机的转速再确定起动频率值。该方式推定速度时已考虑到转速的方向,故在运行中不管是正向还是反向,均可无冲击的平滑再起。

(5) 小型化技术。小型化技术在通用变频器产品上已取得很大成绩,现进一步要在伺服控制型变频器上推进。具体的做法如下:

1) 逆变器和伺服电路的小型化技术。实现小型化的关键是冷却技术,冷却风扇原来一直是用铝铸,从冷却效率的观点采用铆焊和压接较好。此外,部件的集成技术和高密度贴装技术对小型化有很大贡献,支架等部件的贴装技术和系统的 LSI (大规模集成电路) 化是未来研究的重要课题。

2) 电动机的微型化。伺服电动机达到无损耗并微型化是重要的研究课题。为使伺服电动机实现微型化需解决如下技术问题: ①采用稀土类永久磁铁; ②线圈下

线工艺的改进；③用高热传导树脂进行浇注的冷却技术。若采用上述技术的开发成果，电动机的体积将减小为原来的 1/3 实现微型化。

(6) 系统化的对应技术。在实现了通用变频器的多功能和伺服型变频器的高速响应后，要求进一步考虑变频器与系统或网络的连接，例如要求变频器和上位控制的可编程控制器 (PLC) 通过串行通信连接的系统化课题。

一般通用变频器装备有带 RS 485 的标准功能，此外还通过专用的开放总线方式运行。开放总线可适用于不同行业和地区的多种方式，连接和使用非常简便。

由于伺服型变频器的信号高速响应能力强，故它与 PLC 可进行高速的串行通信。该总线由 25MHz、3V 系统进行驱动，故耐噪声能力强，非常有利于伺服系统的高速控制。

## 2. 高压、大功率变频器

380V 中小容量通用变频器目前应用较为广泛，但用电量大，节能最为显著的还是高压大容量变频器。由于高次谐波对电网、电动机影响较为严重，为此此类变频器在主回路上研究如何减少高次谐波是个重点，目前已有许多方案。其次是如何提高逆变元件的耐压能力及串并联技术都是今后技术发展动向。

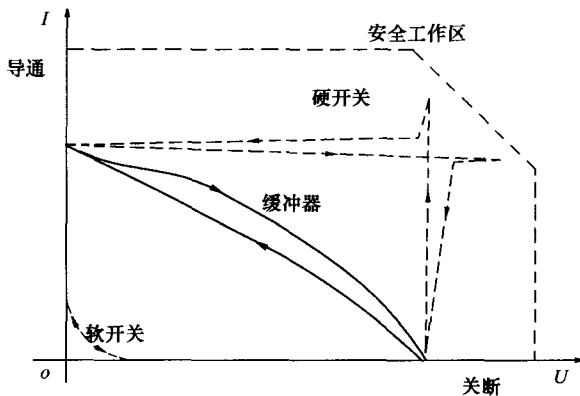


图 1-5 硬开关电力电子器件的典型开关控制曲线

### 1.1.3 谐振软开关变频器

前面介绍的都是硬开关变频器，指的是传统脉宽调制技术 (PWM) 以开关模式工作，在通断过程中都必须切断负载电流，使电力电子器件承受电压或电流应力。如图 1-5 所示为一硬开关电力电子器件的典型开关控制曲线，在开通和关断过程中，电力电子器件必须同时承受较高的电压和电流，从而导致器件产生较高的开关损耗和较大的应力，电力电子电路中通常增加耗散无源缓冲器，以便能降低电力电子器件的  $di/dt$  和  $du/dt$ ，然而，开关损耗与开关频率成正比，因而限制了变频器开关频率的提高，在 20 世纪 80 年代初期，典型的变频器的开关频率限制在几十千赫 (典型的为 20~50kHz) 范围内，由于电力电子电路和电力电子器件存在杂散电感和电容，因而开关过程为具有相当时间的过渡过程，由此带来电磁干扰 (EMI)，图 1-6 所示为电力电子器件的电流和电压的理想波形和实际波形，产生电磁干扰的主要原因是存在振荡的过渡过程。

在 20 世纪 80 年代，大部分的研究集中在谐振变换器的应用上，它是应用谐振原理，利用开关变换器的谐振回路 (Resonant Tank)，使其中的电力电子器件中的

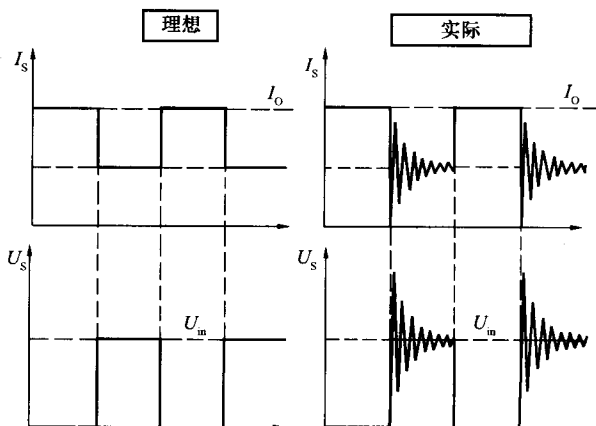


图 1-6 电力电子器件的电流和电压的理想波形和实际波形

电压（或电流）按正弦规律变化，当电流自然过零时，使器件关断（ZCS），或电压为零时，使器件开通（ZVS），从而减少开关损耗，进一步将开关频率提高至几百千赫级（100~500kHz），这样可减少磁性元件的体积，增加变换器的功率密度。对于已研究开发出的各种各样的谐振变换器，绝大部分都存在以下几个问题：与传统的 PWM 变换器相比，谐振变换器都存在较高的尖峰值谐振电流和电压，导致存在较大的开通损耗，也要求电力电子器件具有较高的  $U$  和  $I$  额定值。另外，许多谐振变换器通过调频方式来调节输出，而变化的开关频率使滤波器的设计和控制更为复杂。

在 20 世纪 80 年代末至 90 年代，变换器技术得到进一步的发展，把传统的 PWM 变换器的优点和谐振变换器相结合产生了新一代软开关变换器，除波形的上升沿与下降沿为平滑无瞬间尖峰外，软开关变换器的开关波形与传统的 PWM 变换器的波形相同，与谐振变换器不同，软开关谐振变换器通常采用谐振控制方式，仅允许在电力电子开关开通或关断期间和之前出现谐振，以保证器件在零电流或零电压条件下进行状态转换。除此之外，其特性与传统 PWM 变换器一样，通过简单的修改，许多成熟的为传统 PWM 变频器设计的控制集成电路都可应用于软开关变频器中，因为开关损耗和应力都得到降低，所以软开关变频器可工作在很高的频率上（500kHz），软开关变频器也为抑制电磁干扰提供了有效的解决方法，也应用于 DC-DC、AC-DC 及 DC-AC 和 AC-DC-AC 变换器中。



## 1.2 调速变频电源的发展

### 1.2.1 调速传动的目的

调速传动的目的如表 1-1 所示，调速传动在不同领域中的用途如表 1-2 所示。



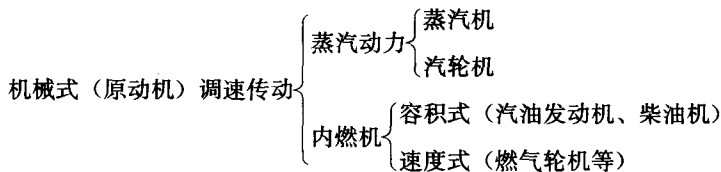
**表 1-1 调速传动的目的**

使用目的	内容
节能	风机、泵类机械根据要求接流量调节转速；挤压机、搅拌机根据负载状态调节转速
自动化	提高搬运机械停止位置精度，提高生产线速度控制精度，采用有反馈装置的流量控制实现自动化
提高产品质量	生产加工实现最佳速度控制及协调生产线内各装置的速度，使其同步、同速提高产品质量和加工精度
提高生产率	根据产品种类，实现生产线的最佳速度和加减速度，提高生产率
提高生产品合格率	不损害产品质量条件下，设备加速时间最小化，实现对外界各种干扰速度的稳定性来提高产品合格率
增加设备使用寿命	采用对设备不产生冲击的起动、停止和空载时低速运转，增加设备作用寿命
设备小型化	采用高速化的设备小型化变频增高，体积减小
增加舒适性	电梯、电车等，采用平滑加速、减速，以提高乘坐的舒适性
环境舒适	改变空调位式控制为速度控制，使空调小功率连续运转，实现环境舒适
植物、家禽良好培植、发育	使空调在植物、家禽最佳生长条件下运转，帮助发育
低噪声	根据负载降低转速，以减小机械和风的噪声

### 1.2.2 调速传动的发展及比较

#### 1. 机械式调速传动

机械式调速传动采用机械式动力源调节传动速度最为古老，其典型方式如下：



**表 1-2 调速传动在不同领域中的应用对象**

使用领域	应用对象
钢铁	轧钢机、辊道、鼓风机、泵、起重机、搬运车
轧钢制线	拉线机、卷绕机、鼓风机、泵、起重机