

张选正 张金远 编著

变频器应用 技术与实践



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



要 點 容 內

变频器应用 技术与实践

张选正 张金远 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是作者几十年从事工业自动化技术工作的经验总结。

本书主要内容有变频器应用基本知识、变频器应用技术基础、变频器电气制动方式与谐波及对策、变频器应用时的注意问题、变频器在工矿企业中的应用、变频器的应用及节电率计算等。

本书内容丰富，实用性强，可供厂矿、企事业单位、节能工程技术部门从事变频调速的电气、自动化专业技术人员、大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

变频器应用技术与实践 / 张选正，张金远编著. —北京：中国电力出版社，2009

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8502 - 0

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 023365 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)

北京市铁成印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 5 月第 1 版 2009 年 5 月北京第一次印刷

850 毫米 × 1168 毫米 32 开本 9.5 印张 234 千字

印数 0001—3000 册 定价 19.00 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



前言

笔者 1985 年 6 月有机会赴日本，在安川（YASKAWA）电机株式会社四个分部工作月余，那时就开始接触变频调速应用技术。退休后又在深圳、广州、上海、杭州的国内或国外公司任总工或技术顾问等职，专门从事变频调速器的应用工作。所以，有机会碰到各行业在变频器应用中遇到的问题及开发课题，先后撰写了专题文章 100 余篇，刊登在《变频器世界》、《电世界》、《电工技术》、《自动化博览》、《电气时代》、《华为科技报》、《自动化商讯》及一些专业会议论文集中。本书编写的目的正是汇集笔者多年应用及开发课题等，力图以应用为出发点，介绍变频器的应用实践与策略。本书主要内容有变频器应用基本知识、变频器应用技术基础、变频器电气制动方式与谐波及对策、变频器应用时的注意问题、变频器在工矿企业中的应用、变频器的应用及节电率计算等。本书的附录部分还列举了常用变频器的技术参数和附件选用表等，供读者参考。因内容来自生产实际，所以具有实用性、可读性、针对性。

本书编写原则是避开高深的理论和繁琐的数学，以物理概念为主导，具有简明扼要、通俗易懂、应用性强和可操作的特点。

书中参考和利用了国内外较多的文献资料，内容深入浅出，注重应用，尤其是精选的实例部分，希望能对读者有所帮助。

由于编写经验有限，书中不足和错误之处，敬请批评指正。

编著者



目 录

前言

第一章 变频器应用基本知识	1
第一节 变频器简介	1
第二节 变频器的特性及选用	5
第三节 变频器典型的原理框图与接线	9
第二章 变频器应用技术基础	14
第一节 变频器主电路形式	14
第二节 变频器的控制形式及特性分析	20
第三节 变频器载波频率值的正确选择	29
第四节 变频器节能运行时的几个问题	37
第五节 功率模块 IGBT、IPM、PIM 的性能及使用时 的有关问题	43
第六节 变频器选用的三个问题	56
第七节 变频器的控制方式及合理选用	60
第八节 变频器可选用的外置单元	62
第九节 变频器的使用要求与节能关系	67
第十节 变频器的保护	69
第三章 变频器的电气制动	72
第一节 能耗制动	72
第二节 直流制动（又称 DC 制动）	76
第三节 回馈（再生）制动	79
第四章 变频器的谐波及对策	84
第一节 变频器的谐波干扰及对策	84
第二节 变频器的谐波特性、抑制方法及测量	87
第三节 高压变频器的谐波	98

第四节	抑制变频器电磁干扰的有效方法	110
第五节	共模及差模干扰	114
第五章	应用变频器时应注意的问题	116
第一节	变频器运行条件与参数	116
第二节	变频器应用时的 12 个技巧问题	125
第三节	变频器的几种特殊使用	131
第六章	变频器在工矿企业中的应用	139
第一节	常用变频器的品牌	139
第二节	变频器在各行业中的应用概况	142
第三节	变频恒压供水	164
第四节	变频器在中央空调循环水中的应用	176
第五节	变频器在中央空调系统节能改造中的应用	184
第六节	深圳阳光酒店中央空调节能改造实测	188
第七节	压缩机的变频调速节能	190
第八节	变频器在采油机上的应用	195
第九节	变频器在卷取机上的应用	198
第十节	离心脱水机的变频控制系统	204
第十一节	变频器在注塑行业中的应用	210
第十二节	HSD 型注塑机节能控制装置介绍	220
第十三节	大型注塑机上应用变频器节能改造	223
第十四节	变频器在高温染色机中的应用	227
第十五节	变频器在印染行业染缸工艺中的应用	229
第十六节	变频器在制药厂中的应用	233
第十七节	在制糖行业中分离机上应用变频器后的 成果	235
第十八节	变频器的遥控	240
第七章	变频器的应用及节电率计算	246
第一节	变频器的参数设定	246

第二节	现场调试时常见的几个问题处理	247
第三节	变频器在几种典型负载上的应用	250
第四节	空压机的节电率计算	256
第五节	锅炉鼓风机与引风机的节电率计算	260
第六节	阀门开度与流量的关系	263
附录		268
附录 A	国内外主要变频器的技术规范	268
附录 B	变频器常用附件的选用	288
参考文献		298



第一章

变频器应用基本知识

机电源频率值及电压值的自动化电气装置（或设备）。变频器由电力电子器件（如 IGBT 模块）、电子器件（集成电路、开关电源、电阻、电容）、微处理器（CPU）等组成，接在电源输入端（L1，L2，L3）和电动机输入端（U，V，W）之间（见图 1-1）。

功率范围：0.75 ~ 500kW（大于此功率值建议选用高压电动机及高压变频器）。

频率范围：0 ~ 400Hz（指通用变频器），0 ~ 120Hz（指水泵、风机用的变频器）。

电压范围：0 ~ 380V（或 440V、660V，指低压变频器）。

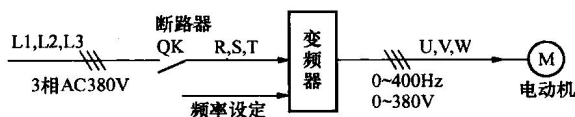


图 1-1 变频器在电路中位置

三、为什么要改变频率

三相交流异步电动机是用来把交流电能转化为机械能的，电动机有笼型和绕线转子型（较少使用）两种。由于异步电动机具有结构简单、体积较小、价格低廉、经久耐用、维修量小等优点，被大量地使用在交流传动上，其配上变频器，完全可代换其他调速装置，如直流调速、转差调速、滑差调速、串级调速、换向器电动机调速、液力偶合调速等。

异步电动机定子磁场的转速 n_0 又称为同步转速， $n_0 = 60f/p$ ，单位为 r/min。这里 f 是频率， p 是电动机磁极对数。转速与极对数的关系见表 1-1。

表 1-1

转速与极对数的关系

转速 n_0	3000	1500	1000	750
极对数 p	1	2	3	4

异步电动机的实际转速 n 总是小于 n_0 , 转差

$$s = \frac{n_0 - n}{n}$$

一般 s 在 1% ~ 5% 范围内, 它决定于气隙大小、硅钢片质量、铜耗、铁耗、风阻、摩擦、电动机结构等因素, 见表 1-2。

表 1-2 实际转速与同步转速的关系

实际转速 n	2960	1460	960	720
同步转速 n_0	3000	1500	1000	750

整理后, 异步电动机转速

$$n = \frac{60f}{p} (1 - s)$$

从上式可知, 只要改变 f 、 s 和 p 中的任意一项即可改变电动机转速, 其中, 改变 p 调速是有级的, 即选用多极电动机, 但多极电动机绕组较复杂, 因而改变 s 调速是不经济的。对笼型异步电动机只有改变频率 f 才是既经济又无级的调速方式。改变频率又称变频, 而变频器就是起到这个作用的装置。

四、变频时为什么还要改变电压

(1) $f \leq 50\text{Hz}$ 时 电动机定子绕组内的感应电动势为

$$E_1 = 4.44fWR_{w1}\Phi_1$$

式中 W ——定子绕组的匝数;

R_{w1} ——绕组系数;

Φ_1 ——电动机每极磁通。

定子电压 U_1 和定子绕组的感应电动势 E_1 的关系为

$$U_1 = E_1 + I_1 Z_1$$

式中 Z_1 ——定子绕组每相阻抗;

I_1 ——定子绕组相电流。

若忽略定子压降 $I_1 Z_1$, 则 $U_1 \approx 4.44fWR_{w1} \Phi_1$, 令 $k = 4.44WR_{w1}$, 则 $E_1 = kf\Phi_1$, 所以 $\Phi_1 \approx E_1/kf \propto U_1/f$ 。在频率 f 下降时, 若 U_1 不变, 则 Φ_1 上升, 要产生铁心的磁通饱和现象, 为使磁通不变, 必须在 f 下降时使 U_1 同时下降, $U_1/kf = C$ (常数), 才可使磁通不饱和, 保持 Φ_1 不变。这样电磁转矩 T 与 $(U_1/f_1)^2$ 成正比, 也不变, 即电动机拖动负载能力不发生改变。所以, 变频时一定还要变压 (故有 VVVF 之称)。这种恒磁通变频变压调速方式, 又称为恒转矩调速, 即 $T = C$ (见图 1-2)。

(2) $f > 50\text{Hz}$ 时 U_1/f 下降, 但 U_1 不能高于电动机的额定电压, 这样 f 增加, U_1 不变, 则 $\Phi_1 \approx U_1/kf$ 变小, 电磁转矩也变小, 但 f 上升, 电动机转速 n 增加。若令角速度 $\omega = 2\pi f$, 则电动机的功率 $P = T\omega$, 即 $T = P/\omega$ 。所以, ω 上升即 f 上升时, T 下降, 从而使功率 P 不变, 这种升频定压调速称为恒功率调速, 即 $P = C$ (见图 1-3)。

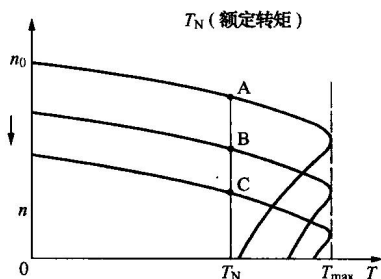


图 1-2 恒转矩变频
调速的机械特性

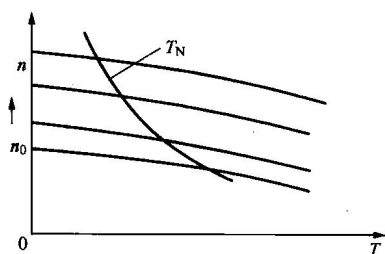


图 1-3 恒功率变频
调速的机械特性

(3) $f < 20\text{Hz}$ 时 在低频段时定子绕组的压降不可忽视, 表现为输出转矩减小, 所以变频器都要有低频区电压补偿的功能。

第二节 变频器的特性及选用

一、变频器的工作特性 (见图 1-4)

从图 1-4 可知, $f=0 \sim 50\text{Hz}$ 是恒转矩区, 即 $T=C$, 这时功率 P 呈线性上升。 $f=50 \sim 400\text{Hz}$ 是恒功率区, 即 $P=C$, 这时转矩 T 呈非线性下降。在实际使用变频器时, 必须要注意的是负载

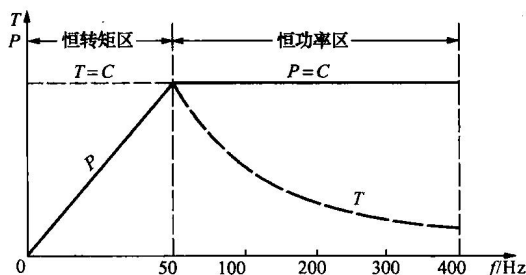


图 1-4 变频器的转矩特性

的机械特性要与变频器的工作特性很好地相互匹配, 才能更好地发挥变频器的应有作用。

二、变频器的外特性 (见图 1-5)

变频器的外特性是讨论变频器的输出电压与频率之间的关系, 即 $U=F(f)$ 曲线, 这里 U 是输出电压, f 是输出频率, F 是函数, 一般是线性关系, 常用的有:

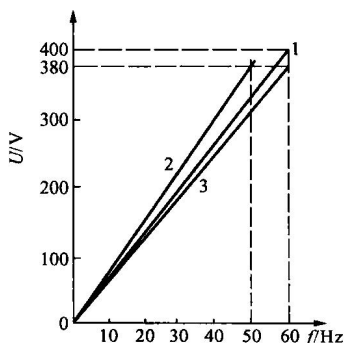


图 1-5 变频器的电压频率特性
1— $U=400\text{V}$, $f=60\text{Hz}$; 2— $U=380\text{V}$, $f=50\text{Hz}$; 3— $U=380\text{V}$, $f=60\text{Hz}$

$$1) U=400\text{V}, f=60\text{Hz}, U/f=400/60=6.67;$$

$$2) U=380\text{V}, f=50\text{Hz}, U/f=380/50=7.6;$$

$$3) U=380\text{V}, f=60\text{Hz}, U/f=380/60=6.3。$$

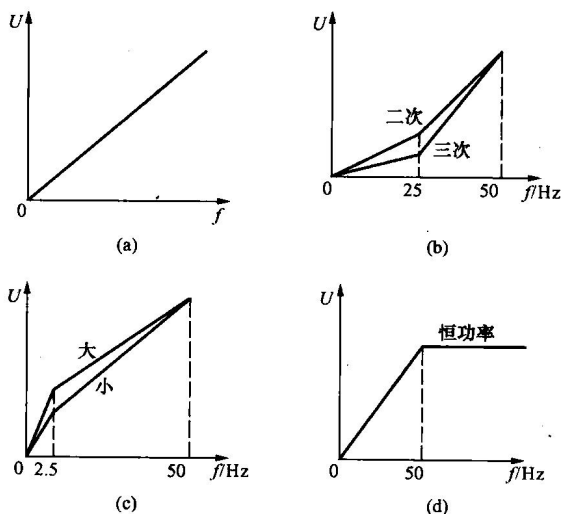
表 1-3 所示为输出电压与频率的实测值, 供参考。

表 1-3

输出电压与频率的实测值

f/Hz	60	50	45	40	35	30
U/V	400	373	333	299	256	219
f/Hz	25	20	15	10	5	
U/V	183	149	113	77	38	

为了配合不同负载, 根据低频补偿的使用要求, U/f 曲线可人为设定选用, 以更好地发挥变频器的使用功效 (见图 1-6)。

图 1-6 不同负载时的 U/f 特性选择

(a) 适用一般用途恒转矩负载;

(b) 适用风机、水泵二次方减转矩负载或三次方减转矩负载;

(c) 适用高起动转矩, 小的或大的负载; (d) 适用一般机床、工具机、主轴

三、使用变频器的目的及效果

变频器的应用范围很广,凡是使用三相交流异步电动机电气传动的地方都可装置变频器,对设备来讲,使用变频器的目的无非是三个:

1) 对电动机实现节能 使用频率范围为 $0 \sim 50\text{Hz}$, 具体值与设备类型、工况条件有关。

2) 对电动机实现调速 使用频率范围为 $0 \sim 400\text{Hz}$, 具体值按工艺要求而定,受电动机允许最大工作频率的制约。

3) 对电动机实现软起动、软制动 频率的上升或下降,可人为设定时间,实现起、制动平滑无冲击电流或机械冲击。

变频器的使用可节省电能,降低生产成本,减少维修工作量,给实现生产自动化带来方便和好处,应用效果十分明显,对产品质量、产量、合格率都有很大提高。

四、什么情况下要选用变频电动机

一般交流异步电动机配用变频器时,电动机不需要更换,这就减少了投资,但在下列情况时,要选用专门的变频电动机。

1) 工作频率大于 50Hz 时(甚至高达 $200 \sim 400\text{Hz}$,在相应转速下工作,一般电动机不能胜任其机械离心力)。

2) 工作频率小于 $10 \sim 20\text{Hz}$,长期重负载工作时(因通风量减少,一般电动机要产生过热,电动机绝缘受损)。

3) 调速比 $D = n_{\max}/n_{\min}$ 较大(如 $D \geq 10$)或频率变化频繁的工作条件下。

4) 调速比 D 较大,工作周期又不长,甚至正、反转交替,飞轮力矩 GD^2 也大,要实现能量回馈制动的工作方式的情况下。

5) 传动需要,用变频电动机更合适的情况下。

变频电动机的主要特点:

1) 散热风扇由独立的恒速电动机带动, 与转子的转速无关, 风量为定值。

2) 机械强度设计可确保在最高速使用时安全可靠。

3) 磁路设计适合最高和最低使用频率的要求。

4) 高温条件下的绝缘强度设计比一般电动机有更高的要求。

5) 高速时产生噪声、振动、损耗等都不大。

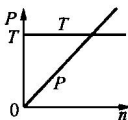
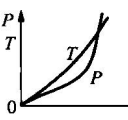
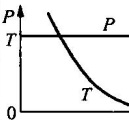
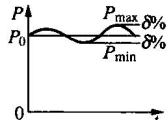
6) 价格比一般电动机贵, 大约是 1.5 ~ 2 倍。

五、负载的机械特性

各行业使用的机械设备五花八门, 其负载类型及相关参数见表 1-4。水泵、风机变频调速后的节电率见表 1-5。

表 1-4

负载类型及相关参数

负载类型	恒转矩 $T = C$	二次方转矩 $T \propto n^2$	恒功率 $P = C$	波动功率 $P \neq C$
特性曲线				
常见主要设备	输送带、起重机、挤压机、压缩机、罗茨鼓风机、柱塞泵	各种风机、泵类	卷取机、轧机、机床加工	破碎机、粉碎机、冲床、压床、剪床
功率与转速关系	$P \propto n$	$P \propto n^3$	$P = C$	$P \neq C$ 波动量 $\delta\%$
使用变频器目的	节能调速	节能为主	调速为主	可以节能
节电效果	一般	显著	不能	少量
节电率估算	$N\% = \Delta n \downarrow \%$ 一般不大于 20%	$N\% = 100 - P\%$ $P\% \propto n^3$ 具体查 表 1-5	$N\% \approx 0$	$N\% \approx 2\delta\%$

注 $N\%$ 是节电率的百分值; $\Delta n \downarrow \%$ 是转速允许下降值的百分值; C 是常数; $\delta\%$ 是功率波动率。

表 1-5 水泵、风机变频调速后的节电率

流量 Q (%)	100	90	80	70	60	50	40
转速 n (%)	100	90	80	70	60	50	40
频率/Hz	50	45	40	35	30	25	20
轴功率 P (%)	100	73	51	34	22	13	6.5
节电率 N (%)	0	27	49	66	78	87	93.5
压力 H (%)	100	81	64	49	36	25	16

第三节 变频器典型的原理框图与接线

一、典型变频器的原理框图 (见图 1-7)

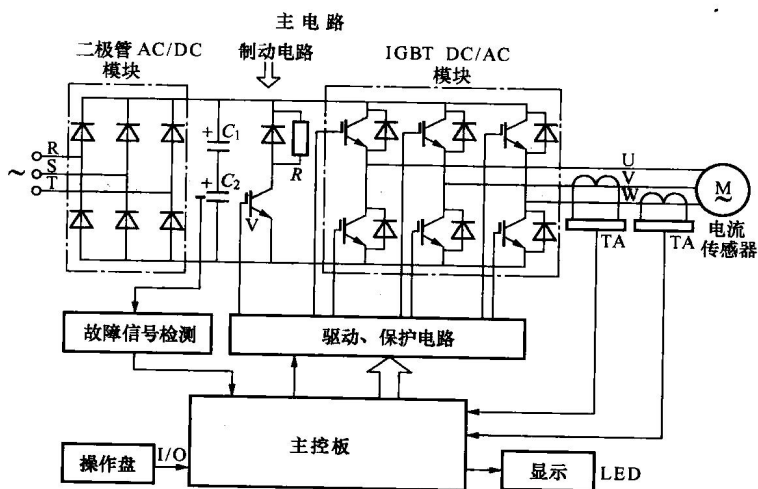


图 1-7 典型变频器的原理框图

尽管国内目前应用的变频器的品牌有约 120 种之多，外观不同，结构各异，但基本电路结构是相似的，主要有：

1) 主电路——对低压变频器来说,其主电路几乎均为电压型交—直—交电路。它由三相桥式整流器(即 AC/DC 模块)、滤波电路(电容器 C)、制动电路(晶体管 V 及电阻 R)、三相桥式逆变电路(IGBT 模块)等组成。电压型变频器是以电压源向交流电动机提供电功率的,优点是不受负载功率因数或换流的影响。缺点是负载出现短路或波动时,容易产生过电流,烧损模块,故必须在极短时间内采取保护措施,且只适用单方向传送,不易实现能量回馈。

2) 驱动板——由 IGBT 的驱动电路、保护电路、开关电源等组成。

3) 主控板——由 CPU、故障信号检测、I/O 光耦合电路、A/D 和 D/A 转换、EPROM、16MHz 晶振、通信电路等组成。多数采用贴片元件(SMT)波峰焊接的技术。

4) 操作盘及显示——输入 I/O 操作信号,用 LED(或 LCD)来显示各种状态。

5) 电流传感器——用以得到电流信号。

二、日本富士 FR5000G—11S 型变频器接线(见图 1-8)

1. 主电路连接

1) 符号 G 为变频器箱体的接地端子,为保证使用安全,该点应按国家电气规范要求接地,接地电阻不大于 4Ω 。

2) 变频器的电源输入端子用 R、S、T 表示。建议选用带有漏电保护的空气断路器 FAB 接至三相电源,连接时不需考虑相序。不允许以 FAB 开关来起动或停止变频器,应采用面板操作键 FWD、REV 来控制。

3) 变频器电源输出端子用 U、V、W 表示。按使用要求确定正转或反转,若转向不对,任意调换两相即可。输出端严禁接电容器和浪涌吸收器。与电动机之间连线不宜过长,对功率不大