

杜金城 主编

电气变频

调速设计技术



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电气变频 调速设计技术

主编：杜金城

参编：张少军 金 磊

毛仲云 赵汝成

前言

自从 20 世纪 80 年代以来,变频调速技术在工业化国家已开始了规模化的应用。80 年代末,我国的民用及工业建筑电气设计等领域也开始使用变频调速技术。变频调速与传统的调速(如直流电机调速)比较,具有很大的优越性:整个系统体积小、重量轻,控制精度高、保护功能完善,操作过程简便、可靠性高、通用性强。尤其是该技术用于一些高耗能设备的控制上,具有非常显著的节能效果:通过对用电设备进行变频调速技术改造,可使总耗电量减少 30%~40%,节能的量级产生了一种飞跃。如对 1 台 155kW 的风机进行变频调速改造,原风机以额定转速进行运转,年电费支出 31.1×10^4 元,改造后,由于风机能够与各种可能的风量需求相匹配,年电费支出下降为 15×10^4 元。

鉴于变频调速设备的价格总体呈逐渐下降的趋势,而电价却在稳定地上调,因此对建筑工程和企业部分大容量电机进行变频设计与改造,回收投资周期亦很短暂,而所创造的经济效益和社会效益则是显著的。

本书第一~五章介绍实施变频调速技术基本理论、原理、设计选型、调速设备,以及变频调速应用中高次谐波的产生及预防等内容;第六章介绍变频器安装、调试、维护及应用实例;第七章重点介绍变频调速技术在民用建筑电气方面的应用,如恒压供水、电梯、风机、饮用水加药、空调、锅炉燃烧、冷水泵、排水泵及泵组等调速系统;第八章详尽阐述变频调速技术在工业建筑电气如泵类机械、压缩机、特种设备、机床等的节能控制,包括冶金、纺织、造纸、化工、食品、装卸搬运等行业的成功范例;第九章专题论证了变频设备的容量、型号及选用方法,同时还介绍了国内外一些性能优良的变频系统,主要有德国西门子、日本三菱重工、富士等公司的变频器及其应用例证。

本书成稿历时三载,得益于业内专家和同行们的关怀和支持。特别是北京市建筑设计研究院信息部高级工程师李宏毅对文稿章节调整、充实内容诸方面给予了大力帮助。北京建筑工程学院张少军博士、北京崇文区城市建设开发公司毛仲云高级工程师,原国家能源部赵汝成高级(教授)工程师、中国联通宁夏分公司康银忠工程师,还有《建筑创作》杂志社主编金磊高级工程师、助理编辑南桂荣部分地参加本书的编写、绘图、收集资料、打字等工作,在此一并致谢。

作者

1999 年 12 月



前言	
第一章 变频调速技术基本理论及实用性	1
第一节 概述	1
第二节 交流调速方式	2
第三节 变频调速及系统	7
第四节 变频调速节能效益显著	31
第五节 实现生产过程自动化及大幅度提高质量和增加产量	35
第二章 变频调速系统设计原理	39
第一节 关于负载理论	39
第二节 变频系统设计要点	40
第三节 以位置作为控制对象的变频系统设计要点	45
第四节 以张力为控制对象的系统设计	48
第五节 以流量为控制对象的变频调速系统设计	51
第六节 以温度为控制对象系统设计	55
第七节 以压力为控制对象系统设计	57
第八节 要求快速响应变频调速系统设计	60
第九节 控制精度高的调速系统应用及设计	67
第十节 关于负负载及冲击负载	69
第三章 变频调速系统设计选型	77
第一节 变频器运行方式	77
第二节 变频器的选择	85
第四章 变频调速设备	90
第一节 电机特性与负载特性	90
第二节 电机启动、噪声和振动	94
第三节 标准鼠笼电动机	97
第四节 防爆电机、单相电机与同步电机	101
第五章 高次谐波对变频器的危害及预防	102
第一节 高次谐波的产生及其影响	102
第二节 减轻与防止高次谐波方法	107
第六章 变频器安装及维护	111
第一节 安装环境	111
第二节 安装与接线	112
第三节 抗干扰措施	119
第四节 关于调试的一般说明及过程	122
第五节 维护、维修及检查	131
第七章 变频调速技术在民用建筑电气方面的应用	137

第一节	变频调速恒压供水系统	138
第二节	变频调速电梯系统	143
第三节	变频调速风机系统	152
第四节	变频器饮用水加药系统	162
第五节	变频调速空调系统	168
第六节	变频调速锅炉燃烧系统	171
第七节	变频调速空调冷水泵系统	173
第八节	变频调速排水泵系统	175
第九节	厂区泵组调速系统	176
第十节	变频器在民用建筑电气中应用前景	178
第八章	变频调速技术在工业建筑电气方面的应用	179
第一节	泵类机械的节能控制	179
第二节	压缩机节能控制	187
第三节	特种设备及机床节能控制	188
第四节	冶金行业节能控制	197
第五节	纺织行业节能控制	205
第六节	造纸工业节能控制	209
第七节	化学工业节能控制	213
第八节	食品行业节能控制	216
第九节	装卸搬运业节能控制	220
第十节	其他方面节能控制	225
第九章	变频器标准及产品	234
第一节	日本标准	234
第二节	欧美标准	237
第三节	西门子变频器系列产品及应用	239
第四节	丹佛斯 (Danfoss) 变频器	255
附录	怎样阅读产品文件及应用问答	263
第一节	产品文件	263
第二节	标准规格与通用规格	263
第三节	变频调速技术及基本理论问答	269
第四节	变频器运行保护问答	279
第五节	选用件与消耗品备件问答	280
参考文献		282

第一章



变频调速技术基本理论及实用性

第一节 概 述

实际的生产过程中离不开电力传动。生产机械通过电动机的拖动来进行预定的生产方式。20 世纪 50 年代前,电动机运行的基本方式是转速不变的定速拖动。对于控制精度要求不高以及无调速要求的许多场合,定速拖动基本能够满足生产要求。随着工业化进程的发展,对传动方式提出了可调速拖动的更高要求。

用直流电动机可方便地进行调速,但直流电机体积大,造价高,并且无节能效果。而交流电动机体积小、价格低廉、运行性能优良、重量轻,因此对交流电动机的调速具有重大的实用性。使用调速技术后,生产机械的控制精度可大为提高,并能够较大幅度地提高劳动生产率和产品质量,且对诸多生产过程实施自动控制。通过大量的理论研究和实验,人们认识到:对交流电动机进行调速控制,不仅能使电力拖动系统具有非常优秀的控制性能,而且在许多生产场合中,还具有非常显著的节能效果。鉴于此,交流变频调速技术获得了迅速发展和广泛应用。

自从 20 世纪 80 年代以来,交流电动机变频调速技术在工业化国家已开始了规模化的应用。目前,国外许多优秀的变频调速系统和成套设备已大举进入中国市场,如欧洲的 ABB,德国的西门子,丹麦的丹佛思,日本的三肯、三菱、松下、富士、春日,法国的施耐德,韩国的三星、LG、九德松益,美国的罗宾康,英国的欧陆等变频器系列。这些国家的厂商除直接提供成套设备外,还有良好的售后服务。

国内目前也生产了几种变频调速设备,其质量可与国外的变频器产品相抗衡,如佳灵公司的佳灵变频器、深圳华为公司的 ENYDRIVE 变频器等。变频调速技术在我国的发展及应用经历了一个曲折的过程。虽然直流电动机具有优秀的调速性能,但同时也存在着一些难以克服的问题,如:直流电动机故障率较高,在各种应用场合不节能、噪声大等。工业及民用建筑中大批量交流电动机在定速拖动机械运转的情况下,由于无法与实际的运行工况相匹配,处于低效率运行,造成电能的浪费较大。这些传动系统由于交流电动机的定速拖动,不能使传动与拖动系统具有良好的控制性能。

为解决交流电动机的调速问题,采取了一些措施,如:滑差离合器调速、异步电动机的变极调速、定子调压调速、转子串电阻调速等。直到后来出现了绕线式异步电动机的串极调速及变频调速。尤其是变频调速,其适合于任何种类的交流电动机,前景广阔,发展

尤为迅速。在变频调速技术发展的初期，由于电力半导体元件体积大、可靠性差、造价高，导致调速设备也存在体积大、价格昂贵、可靠性差的缺点。进入 70 年代后，电力半导体技术、大规模集成电路技术都获得了长足的发展，计算机技术向控制领域深深地渗透与融入，使变频调速技术迅速地发展起来。高性能、高可靠性的调速（变频）装置已大量地进入工业、生活领域。

20 世纪 80 年代以前，由于国产的可控硅元件在安全性、可靠性、大功率化方面都没有过关，极大地限制了国内变频调速技术的发展。直至 80 年代初，我国的可控硅生产制造技术才取得了实质性的重大进展，生产出了能够长时间稳定、可靠、安全工作的大功率可控硅元件。1982 年我国首次使用核潜艇发射（潜射）远程火箭，使用的电力系统就是国产的可控硅元件。自此之后，使用国产元件研制出的性能较好的变频调速设备陆续问世。

从总体上看，我国在变频调速设备所用的元器件生产技术、成套设备的生产技术与国外先进水平相比，还有较大差距。相信在不久的将来，我国的变频调速技术及应用将赶上国际先进水平。

与传统的调速技术如直流电动机调速相比，变频调速具有极大的优越性，整个调速系统体积小，重量轻、控制精度高、保护功能完善、工作安全可靠、操作过程简便、通用性强，使传动控制系统具有很优良的性能。用变频调速装置驱动电动机去拖动风机、水泵及其他机械时，与常规的不调速电机拖动相比，节能效果十分可观。几十年来工业领域应用的一些单项节能技术，其数量级一般为几个百分点，而采用变频调速技术后，在泵类及机械类工作运行中，可产生 30% ~ 40% 的节能效果，使节能数量发生了飞跃。

对企业 and 用户来讲，对定速拖动时电耗较高的机械或设备，进行变频调速技术改造，或直接变频调速拖动，经济效益是显著的，回收投资期也是较短的。

从变频调速技术在我国的应用普及的情况看，存在着相当多企业对应用这项技术的意义、重要性认识不足的现象，原因在于对这项技术的有关基础理论、应用情况不熟悉。因此，通过出版一些关于变频调速技术的通俗性读物、专著，持续性地撰写一些介绍该技术及应用的文章，对于推动我国企业中相关工程技术人员更深入地了解变频调速技术及应用情况是很有益处的。

第二节 交流调速方式

交流调速技术自问世到现在，经历了几十年的过程，先后出现了多种的交流调速方式，直到现在，一些调速方式依然继续在一些生产过程中使用。下面对这些不同的交流调速方式给以简要地介绍，并做适当地比较。

一、异步电机变极调速

三相交流电动机定子绕组中的三相交流电在定子气隙圆周上产生一个旋转磁场，这个旋转磁场的转速称同步转速，记为 n_0 ，实际电动机转速 n 要低于同步转速，故一般称这样的三相交流电动机为三相异步电动机。

1. 工作原理

异步电动机的同步转速遵从电机学基本关系

$$n_0 = 60f/p \quad (1-1)$$

式中 f ——电源交变频率, Hz, 我国工业频率 f 为 50Hz;

p ——电机定子磁极对数。

电机学中还常用转差率 s 参量, 其定义为

$$s = (n_0 - n)/n_0 \quad (1-2)$$

电机实际转速为

$$n = (60f/p)(1 - s) \quad (1-3)$$

设定频率 f 不变, 调节电机定子磁极对数 p , 即可使同步转速 n_0 与实际转速 n 得到调节, 这就是变极对数调速的原理。

2. 变极调速时的机械特性

研究电机拖动时, 依据的一个重要关系是电动机的电磁转矩 M 与转速 n 之间的关系, 这个关系叫电动机的机械特性, 描绘成曲线时, 叫机械特性曲线。

当没有进行调速时, 电机的电磁转矩 M 与转速 n 的关系曲线见图 1-1。从该机械特性中可看出: 电磁转矩在较大范围内变化时, 对应的电机转速变化范围却较小。

图 1-1 中 s_n 为临界转差率, 它与最大转矩 $M_{\max}$ 对应。最大转矩一般是额定转矩的 2 倍左右。

图 1-2 给出了变极对数时的机械特性曲线。极对数调至 1 对极、2 对极、3 对极时, 在同样的转矩 M 值下, 转速不一样, 用此方法实现了阶跃式调速。

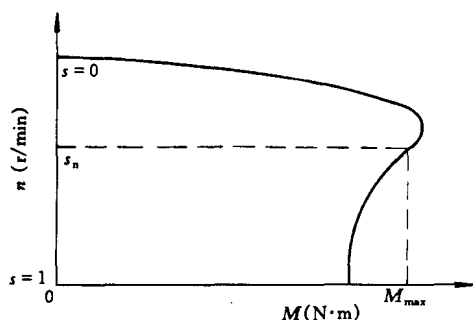


图 1-1 电动机机械特性曲线

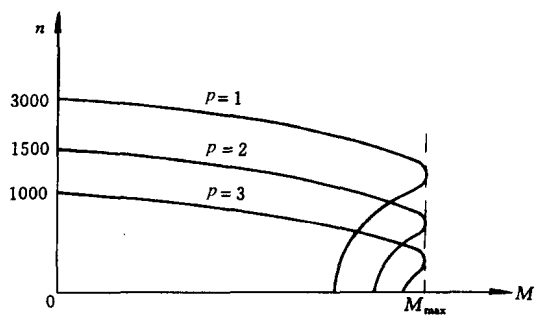


图 1-2 变极对数机械特性曲线

3. 变极调速的特点

该方法具有以下特点: 它属于有级调速, 即跳变式调速; 要实施变极调速, 须通过外接定子绕组控制线路的切换来完成。

变极调速适用于绕线式异步电动机。

二、定子电压调速

(一) 工作原理

以调节定子绕组电压的方式实现电机转速变化。

1. 开环调压调速

控制理论中,定义能够自动跟踪,将输出反馈回输入侧,进行自动有差调节的控制为闭环控制;输出与输入无反馈关系,即不能进行自动调整的控制方式称为开环控制。在开环状态下,对定子电压进行调节,由于电动机电磁转矩 M 与定子电压 U 的平方成正比,而转矩 M 又与转速 n 受机械特性关系约束,故调节定子绕组电压的同时,电机转速也得到了调节。

图 1-3 给出了开环调压调速的示意图。当电压由 U_1 调至 U_2 时,机械特性曲线由①变换为曲线②,此时转速对应两个不同值。

在实际拖动场合中,负载性质往往不同,有恒转矩负载,如风机、水泵类等。当电机拖动绞车起吊重物时,由于负载重量 W 恒定,对绞车形成的阻转矩是定值,故这类负载称为恒转矩负载。在对风机、水泵的拖动中,转矩与转速的平方成正比,即转速稍有增加,引起转矩的增加幅度很大。

恒转矩负载特性与风机、水泵负载特性分别见图 1-4 中的曲线①与曲线②。

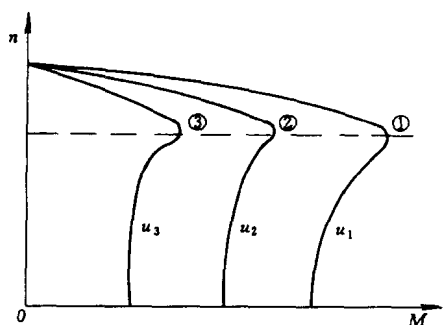


图 1-3 开环调压调速示意图

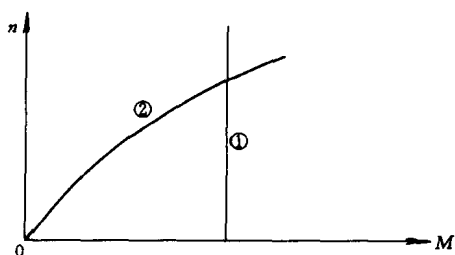


图 1-4 恒转矩负载与风机、水泵类负载特性曲线

对恒转矩负载,调压调速意义不大,由图 1-5 可见;当定子电压由 U_1 变换为 U_2 时,转速由特性曲线上的 A 点变到 B 点,调节范围太小,仅限 AB 间一小段。

对风机、水泵类负载,调压调速的范围相对恒转矩负载要大一些,见图 1-6,但在低速段,电机定子绕组功率因数低,此种方法也不经济。

2. 闭环调压调速

闭环调压调速系统中,使用了测速发电机,转速 n 不同,测速发电机输出电压 U_d 不

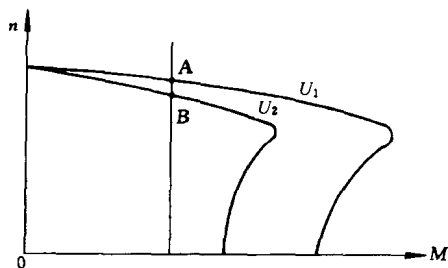


图 1-5 恒转矩负载机械特性曲线

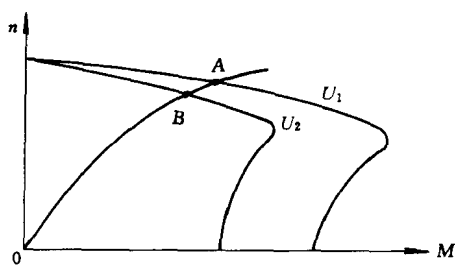


图 1-6 风机、水泵类负载机械特性曲线

同，系统中设定一个参考电压 U_d ，将 U_d 与 U_d 比较，得差动电压 ΔU ，经放大器处理，送至触发电路，根据 ΔU 控制触发脉冲的发出时刻，对应不同的电压值输出，即实现闭环的调压调速。

(二) 调速特点

由于开关元件的关断与开通，使定子电压、电流中存在幅度较高的高次谐波分量，对电网影响较大，且功率因数较低。此调速方法仅适用于中小型电动机。

三、转子串电阻调速

1. 工作原理

在绕线式交流异步电动机的转子绕组中，接入阻值可调节的变阻器，改变其阻值实现调速。图 1-7 中， sE_2 为转子电动势有效值，转子绕组电路中的电流即是转子电动势所引起； sX_2 为转子漏电感， r_2 为转子电阻， R_w 为外接变阻器。

转子绕组电路串电阻实现调速的过程是：增加电阻 R_w 时，转子电流 I_2 减小，电动机转矩下降，此时负载转矩大于电动机电磁转矩，电机转速下降，直到负载转矩等于电磁转矩时，电机才在较低的转速下运行。减小电阻 R_w 时，电机转速上升。

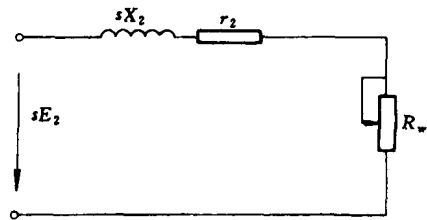


图 1-7 转子串电阻调速原理示意

2. 调速特点

此调速方法的调速范围小，同时由于使用接入电阻的方式调速，造成附加的能耗损失。在调速过程中，当调电阻 R_w 使之增大时，转速下降，电磁转矩下降，此时转子线路中转子电动势增加（转子电动势 sE_2 ），使转子电流增加并又导致电磁转矩增大，进而使电磁转矩等于负载转矩，这一过程负载转矩值不变。因此，转子串电阻调速方式仅适用于恒转矩负载，如吊车提升系统，且转子串电阻调速的线路较简单。这种调速方法仅能在绕线式电动机上使用。

四、串级调速

1. 工作原理

绕线式电机转子等效电路见图 1-8。如果在转子绕组中再串入一个与转子电动势 sE_2 同频率的附加电动势 E' ，则电路见图 1-9。

当串入的附加电动势极性与转子电动势同极性时，则转子电路中合电动势数值增加，

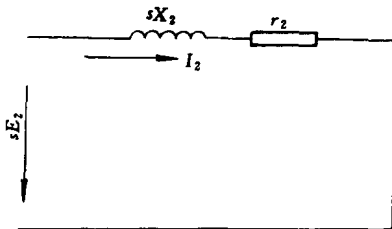


图 1-8 绕线式电机转子等效电路

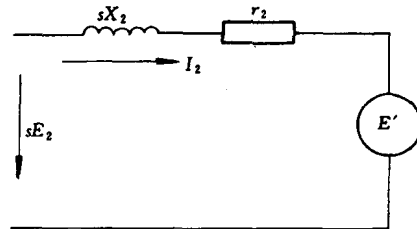


图 1-9 转子电动势与附加电动势

转子回路中的电流增大，电磁转矩增大，转速增加；当串入的附加电动势与转子电动势 sE_2 极性相反时，转子电路中的合电动势减小，转子回路电流减小，电磁转矩降低，转速减小。

2. 实现串级调速的方法

串级调速过程如下：转子电路中，转子绕组电动势 sE_2 与外加电动势 E' 迭加，由于 sE_2 是正弦电动势，因此要求附加电动势 E' 也是正弦电动势并与 sE_2 有相同的频率，要做到这一点技术难度相当大，故通过大功率整流元件将正弦转子电动势变为直流，而附加电动势也是直流电动势，但附加电动势是由可控硅可控整流，通过控制可控硅开通关断时间，来调整附加电动势的平均值，即控制了转子电路中的总电动势，这样通过调节总电动势来调节转子电流，进而控制电动机的转速。

实现串级调速的原理电路见图 1-10。图中 L 为平波电抗器， M 为绕线式异步电动机， E_{T0} 为逆变变压器， R 为整流器， I 为逆变器。

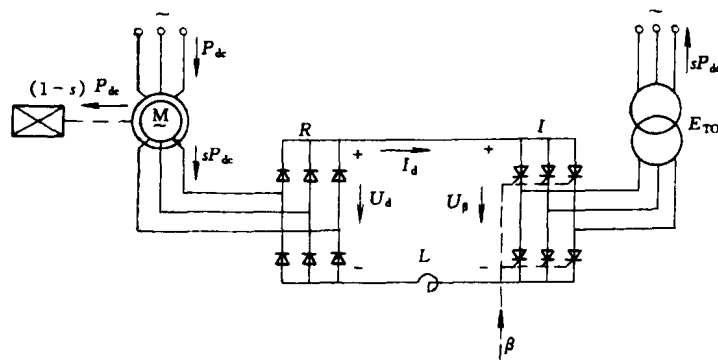


图 1-10 串级调速系统原理

转子转差电动势 sE_2 经三相整流桥 R 整流为直流电压 U_d ，再由三相逆变器 I 将直流功率 $U_d I_d$ 回馈给电网。平波电抗器 L 的作用是平抑直流电流 I_d 的脉动。逆变变压器的作用是使逆变器输出的交流电压回馈给交流电网。

3. 高功率因数串级调速系统

近年来，出现了一种高功率因数串级调速系统，它采用了方脉冲触发可控硅通断的工作方式，较好地改进了传统的串级调速系统的一些固有缺点。

4. 串级调速评价

(1) 优点是调速性能好。当电动机减速时，转子电路中的电能将通过逆变器馈回电网，使减速过程中的机械能转化成电能，无损失地送回电网。因此，这种调速方式节能效果较为显著。

(2) 缺点。由于串级调速系统使用了较多的开关元件与电网耦合连接，系统中高次谐波窜入电网较严重；另外，系统功率因数低。

5. 适用范围

串级调速系统仅适用于绕线式异步电动机。

第三节 变频调速及系统

一、变频调速工作原理

前面列出了电机学的一个基本公式

$$n_0 = 60f/p$$

式中电动机定子绕组的磁极对数 p 一定, 改变电源频率 f , 即可改变电动机同步转速。异步电动机的实际转速总低于同步转速, 而且随着同步转速而变化。电源频率增加, 同步转速 n_0 增加, 实际转速也增加; 电源频率下降, 电机转速也下降, 这种通过改变电源频率实现的速度调节过程称为变频调速。

在工程中, 鼠笼式电动机在电动机总数量中占主导部分。因此, 对鼠笼式电动机的调速控制成为建筑领域中电机调速的主要部分。在变频调速技术中, 向电动机提供频率可变的电源并控制电动机的转速是由变频器完成的。变频器 (VVVF) 是 Variable Voltage Variable Frequency 等英文字头的缩写, 意思是变压变频器。

二、调速控制方式

其控制方式基本上有以下 3 种。

1. 电源频率低于工频范围调节

电源的工频频率在我国即 50Hz。电机定子绕组内的感应电动势公式为

$$E_1 = 4.44f_1 WR_{w1}\Phi_1 \quad (1-4)$$

式中 W ——电机定子绕组匝数的常数;

R_{w1} ——绕组系数;

Φ_1 ——电机每极磁通。

定子电压 U_1 与定子绕组感应电动势 E_1 的关系为

$$U_1 = E_1 + I_1 Z_1 \quad (1-5)$$

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 $U_1 \approx E_1 = 4.44f_1 WR_{w1}\Phi_1$, 把该式整理成

$$E_1 = Kf_1\Phi_1 \quad (1-6)$$

$$K = 4.44f_1 WR_{w1} \quad (1-7)$$

则

$$\Phi_1 = U_1/Kf_1 \quad (1-8)$$

电动机的电磁转矩 M 与 $(U/f_1)^2$ 成正比, 若下调电源频率 f_1 , 同时也下调 U_1 , 使 (U_1/f_1) 比值保持为恒量, 则磁通 Φ_1 不变, 因此, 转矩也保持常值, 此时电动机拖动负载的能力不发生改变, 这种控制方式称为恒磁通调压调频调速, 也叫恒转矩调速。

2. 电源频率高于工频范围调节

由于使电源频率 f_1 增加, U_1/f_1 变小, 而 U_1 不能高于额定电压, 在该控制方式中, 保持 U_1 不变, 由于频率变高, 由式 (1-8) 知道, 定子磁通 Φ_1 变小, 电磁转矩 M 也变

小，但电源频率增加导致电动机转速 n 增加，设电动机转动角速度 $\omega = 2\pi n$ ，电机的功率 P 是电磁转矩 M 与角速度 ω 的乘积

$$P = M \cdot \omega \quad (1-9)$$

调节过程中，使频率 f 与转矩的变化呈一定协调关系，从而保持电机功率 P 为恒量，即功率不发生变化，这种升频定压调速称为恒功率调速。

3. 转差频率控制

三相异步电动机中，定子与转子之间的圆周空隙内有一旋转磁场，转速为 n_0 ，电机转子实际转速为 n ， $(n_0 - n)$ 是转子与旋转磁场之间的相对切割速度。对频率、电压进行谐调控制，使 U_1/f_1 不变，此时，磁通 Φ_1 也不变，在 Φ_1 不变的条件下，电磁转矩 M 与 $(n_0 - n)^2$ 成正比。对频率 f 进行调节，即调节了 $(n_0 - n)$ ，因此，在实现转速调节时也实现了转矩的调节。

三、恒转矩与恒功率调速机械特性

如前所述，保持磁通 Φ_1 不变，调频调压，同时使 U_1/f_1 为常数，并且频率在低于工频的范围变化，这种调速方式称为恒转矩调速。恒转矩情况下，电机转速 n 与电磁转矩 M 之关系即机械特性见图 1-11。A、B、C 3 点处对应 3 个转速 n_A 、 n_B 、 n_C ，但转矩相等。电源频率大于工频时的恒功率调速的机械特性如图 1-12 所示。

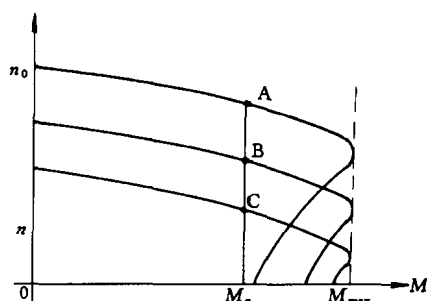


图 1-11 恒转矩调速的机械特性

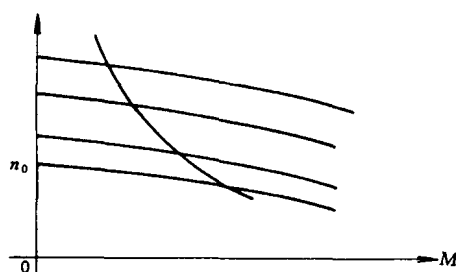


图 1-12 恒功率调速的机械特性

四、变频调速核心设备——变频器

鼠笼型异步电动机的定子采用变频电源供电构成的变频调速系统是具有高效率和高性能的调速系统。通过改变定子供电频率，电机转速可得到宽范围的无级调节。对定子电压（或电源）以及频率按一定规律进行协调控制，可提高传动系统的运行特性。通过控制转差 $(n_0 - n)/n_0$ ，电机可获得较理想的快速响应特性。一旦采用闭环控制系统，整个拖动及传动系统可获得高精度及优良的传动特性。

给电动机定子提供频率可变电设备的设备就是变频器，变频器是变频调速系统的核心部分。变频器与电动机完美的控制配合构成了性能优良的变频调速系统。为分析变频器的工作情况，下面给出异步电动机工作运行的一些必要知识。

（一）异步电动机的特性

由于异步电机中转子转速低于气隙旋转磁场的旋转速度即同步转速，故在转子回路

中，将产生转差电动势，该电动势产生转子电流，转子电流与旋转磁场相互作用产生电磁转矩。

1. 工频电源向异步电动机供电

用工频 50Hz 电源给异步机供电，驱动电机运行时，下面给出转矩 M' 与转速 n 之间的关系见图 1-13。从图中看出，当转速与转矩反向时，电动机处于制动区；当转矩与转速同向时，电动机处于电动区，当速度高于同步转速后，电动机进入发电区，此时，转矩为负。定子电流 I_1 与转速的关系如图 1-14 所示。

将转矩和转速关系，定子电流 I_1 和转速 n 之关系，负载转矩 M 与转速 n 之关系，在一起画出，如图 1-15 所示。

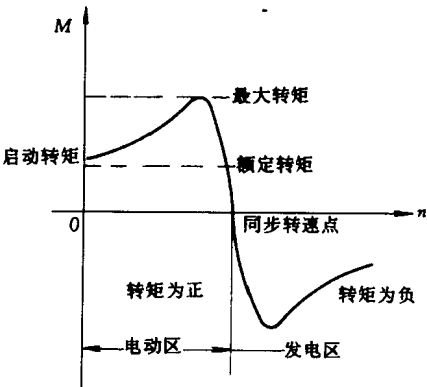


图 1-13 工频供电时转矩与转速特性

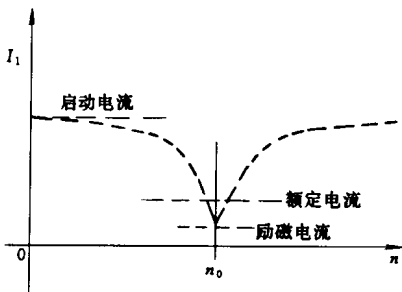


图 1-14 定子电流与转速特性

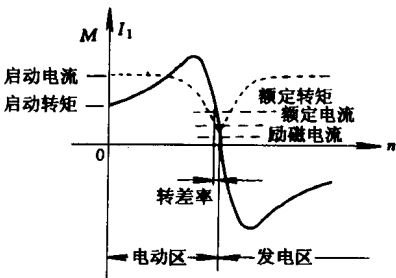


图 1-15 转矩特性 I_1 - n 特性

工频电源供电时，电机转速从 0 开始增加，转矩也增加。到达最大转矩后，又开始下降，在下降段与随速度增加而单调增加的负载转矩曲线相交，相交点是稳定点。此时，电磁转矩与负载转矩平衡，电机稳定运行。

注意上图中转矩特性 M 和 n 的关系，就是前面讲的机械特性，机械特性曲线中，转速 n 为纵坐标表示，电磁转矩 M 为横坐标表示，上图把两个坐标顺序对调了。

2. 用变频器给电动机供电

下面我们讨论用变频器给电动机供电时，机械特性的变化情况。给出频率在 10 ~ 50Hz 时的机械特性曲线，如图 1-16 所示。注意，这组特性是在 U_1/f_1 为常数条件下作出的，即定子电压 U_1 与电流频率 f_1 的比值保持不变时作出的。

从图中看出，在 U_1/f_1 为常数条件下，调节 f_1 使转速得到调节，有一点很重要：在低速区（即低频供电区），电磁转矩明显较正常速度下

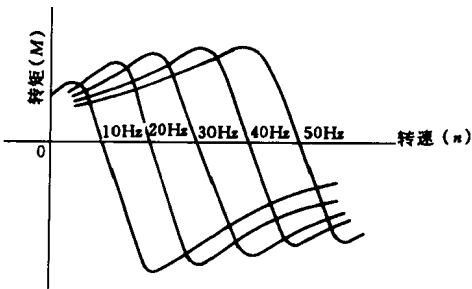


图 1-16 不同频率下的转矩 - 转速特性

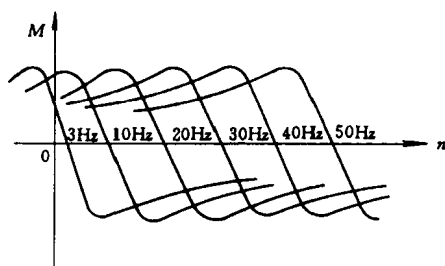


图 1-17 电压补偿后调频转矩特性

的转矩值小，如果这样，会出现的后果是：在低速区，电机拖动转矩小。出现这个问题是由于电机定子电压 U_1 是定子绕组感应电动势 E_1 与定子阻抗压降之和，当频率较低时，定子阻抗电压相对于定子电压不能忽略，造成转矩值下降。解决这一问题的方法是采用端电压补偿，可补偿低频区或低速区时转矩损失，于是，得出用变频器供电时，电机的转矩特性随频率而变的规律，如图 1-17 所示。变频器是介于电源与电动机之间的，电压与频率可调变的

供电环节如图 1-18 所示。

(二) 电压型逆变器与电流型逆变器

从逆变器的主回路上看，如果主回路等效于电压源供电，再把电源的直流量通过开关及控制元件，转化成交流输出，这样的逆变器称为电压型逆变器。主回路等效于电流源供电，开关元件将其转换为交流输出，这种类型的逆变器叫电流型逆变器。

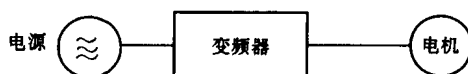


图 1-18 变频器与电源、电动机的关系

1. 电压型逆变器

在分析变频器驱动异步电动机运行时，常用到异步电动机的简化等效电路，如图 1-19 所示。

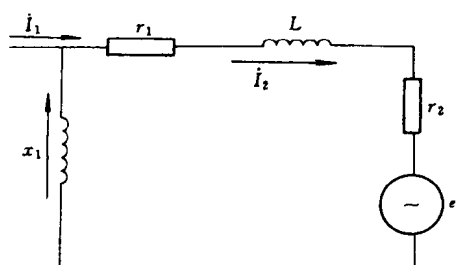


图 1-19 异步机简化等效电路

图中， i_1 为定子电流， i_2 为转子电流， i_e 为励磁电流， U_1 为定子电压，由于分析基本是正弦规律，故电压、电流诸量均使用复数。 r_1 为定子电阻， r_2 为转子电阻， L 为定子与转子的漏感之和， x_1 为励磁电感。 e 为电动机反电动势，它用来与外加电压平衡。

当忽略掉励磁电流 i_e 和定、转子电阻 r_1 、 r_2 后，更简化的异步机等效电路见图 1-20。下面

再来看电压型逆变器的图 1-21 及图 1-22。

逆变器中的开关元件等效于开关，如开关 S1、S2、S3、S4， E_d 为供电直流电压源。开关动作随时间变化的波形为图 1-22 (a)、(b)，对应的 U_{ab} 波形见图 1-22 (c)。

从波形图 1-22 (c)、(d) 中可看出：(0 ~ t_0) 时间段内，

I_d 与 E_d 同方向，(t_0 ~ t_1) 时间段内， I_d 与 E_d 反方向，由电路原理可知，当某段电路电压与电流同向时，电功率为正，该段电路吸收功率；当电压与电流反向时，电功率为负，该段电路放出功率。从波形图可看出，逆变器工作时，既能吸收功率又能向外馈送功率，在变频调速技术中，逆变器一般是向电网回馈功率。

2. 电流型逆变器

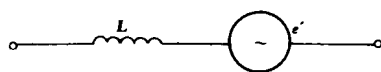


图 1-20 更简化的异步机等效电路

如果逆变器的主回路等效于电流源供电，再将电流源的直流量通过控制开关元件变换为交流输出，这样的逆变器叫电流型逆变器。

图 1-23 为电流型逆变器的分析简图，图中用更简化的异步电动机等效电路代替异步电动机。在此，用单相的情况进行分析，三相异步机是对称三相电路，所以单相的情况自然地适用于三相情况。4 个开关元件的通断图及有关波形图见图 1-24。

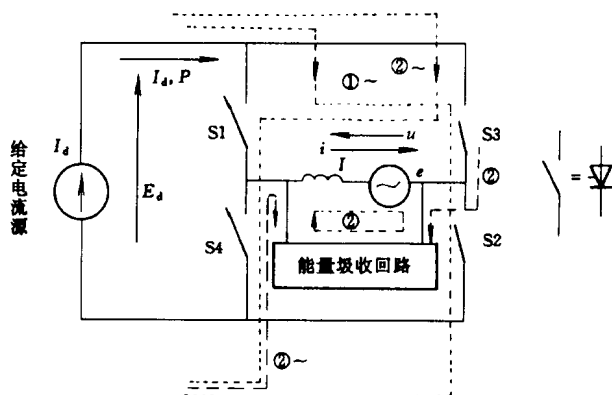


图 1-21 电压型逆变器分析

$E_d = U_{cd}$ ，当时间趋近于 t_1 时刻时，S3、S4 突然闭合，电流的实际方向由原来的自 A 流向 B，突然改为自 B 流向 A，发生电流突变，而电感上要抑制这个电流跳变，由

$$e_L = -L (di/dt)$$

知道，在 t_1 时刻， E_d 电压中含有了上跳尖脉冲，见图 1-24 (d)。比较图 1-24 (c)、(d) 看到有一时间段 ($0 \sim t_0$)，电流 I_{AB} 与 E_d 反向，此时负载功率为负，即负载向电网回馈功率。

在电流型逆变器中，用晶闸管作开关元件，使用了平滑电抗器，使之具有很强的抑制

电流波动的能力，形成等效的电流源，而电压型逆变器中使用了大容量电容，抑制电压脉动，形成等效的电压源。

(三) 逆变器主回路的控制方式

逆变器的控制方式分两种：电压控制及电流控制。与输出频率成比例地控制输出电压，协调控制电压及频率，这一控制方式叫电压控制。当某些控制场合，需要电机具有快速响应特性，此时可采用电流控制方式。

1. 电压控制

变频器中有一部分电路叫变频器，进行电流变换，还有一部分就是逆变器，即把直流量变换为交流电量，输送给异步电动机。在电压控制方式中，不管逆变器采用晶

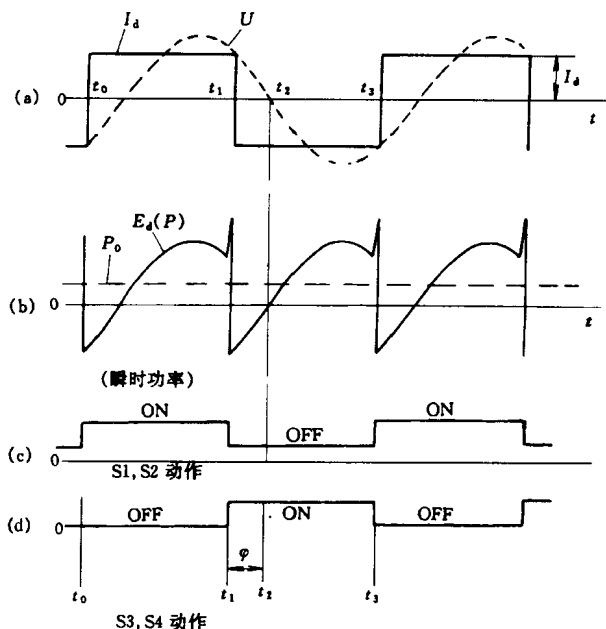


图 1-22 电压型逆变器工作时几个波形关系

(a) 输出电压电流波形；(b) 直流电压波形；

(c)、(d) 开关动作图

闸管还是晶体管 GTO 作主开关元件的逆变器，都在逆变器部分对电压及频率进行控制。有些情况下，可在变流器部分控制电压，在逆变器部分控制频率。

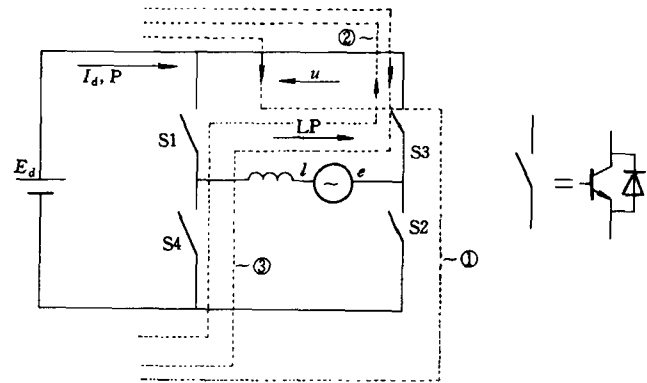


图 1-23 电流型逆变器的分析

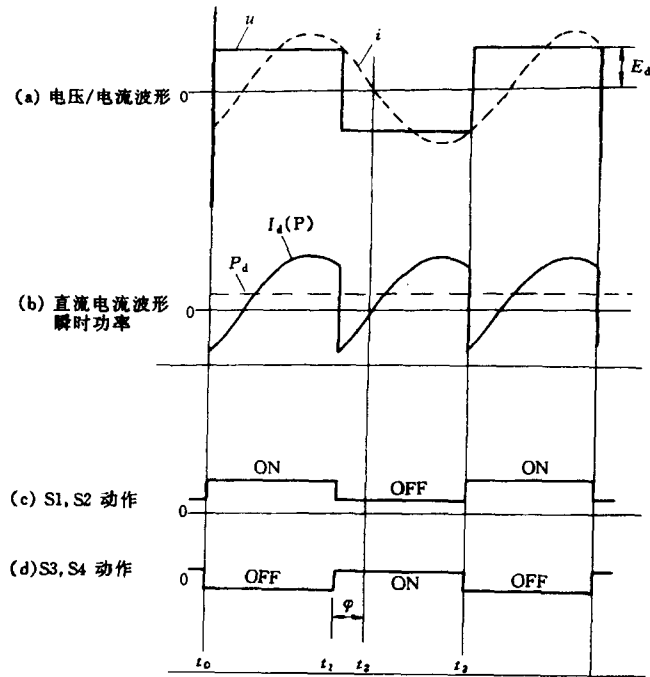


图 1-24 电流型逆变器工作波形

(a) 电压电流波形；(b) 直流电流波形；
(c)，(d) 开关动作图

2. 电流控制

在电流控制这种方式中，一般在变流器部分控制电流，在逆变器部分控制频率。

(四) PAM 与 PWM 输出控制方式

输出电压与输出电流的控制手段有 PAM 与 PWM 方式。