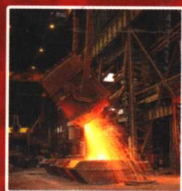


**Rockwell
Automation**



循序渐进 *PowerFlex* 变频器

钱晓龙 李晓理 主编
黄建中 主审



变频器应用案例解密

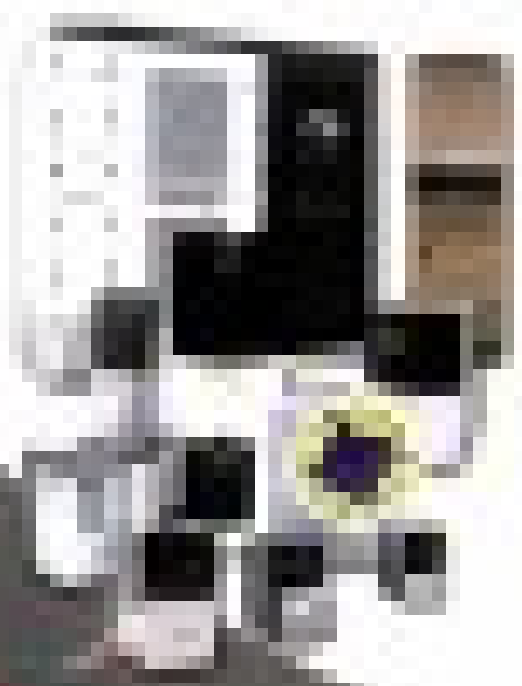


循序漸進

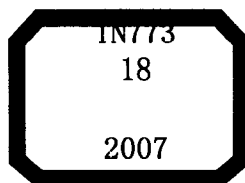
PowerFlex

变频器

变频器应用案例解密



变频器应用案例解密



循序渐进PowerFlex变频器

主编 钱晓龙 李晓理
主审 黄建中

机械工业出版社

本书结合罗克韦尔自动化公司的 PowerFlex 系列变频器产品,将有关动手操作类实训指导资料编辑成教材。书中对变频调速只做简单的介绍,尽量做到言简意赅、通俗易懂。更多的篇幅是通过遴选出的实验实例来说明产品的使用方法和功能特点。

本书以 PowerFlex 系列变频器的 DEMO 实验箱为对象,设计出有针对性的实验题目。力求通过一个个生动的实验例子,采取循序渐进的手段,教会读者一步一步地学会对各种变频器的参数设置和使用。

本书立足于教会从事自动化专业的工程技术人员和自动化专业的学生对当前最先进的变频设备的使用。本书可供变频器使用人员阅读,同时可作为各高校变频调速的教学实验参考书和罗克韦尔自动化公司的高级培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

循序渐进 PowerFlex 变频器/钱晓龙, 李晓理主编. —北京: 机械工业出版社, 2006. 12

ISBN 7-111-20376-3

I. 循... II. ①钱... ②李... III. 变频器—基本知识 IV. TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 137762 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 林春泉 版式设计: 冉晓华 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 陈 沛 责任印制: 李 妍

北京中兴印刷有限公司印刷

2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm • 19.75 印张 • 484 千字

0 001—5 000 册

定价: 33.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010)68326294

购书热线电话: (010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010)88379768

封面无防伪标均为盗版

前言

近几十年来，随着电力电子器件、微处理器和大规模集成电路的飞速发展，变频器在越来越多的场合得到了应用。人们已经从最初理论知识的普及过渡到尽快地对其应用技术进行熟悉和掌握的阶段。2003年9月，罗克韦尔自动化公司大学项目部在东北大学组织召开了一次关于编写自动化技术系列丛书的会议。主要议题是希望各大学实验室结合罗克韦尔自动化公司产品的特点，编辑有关动手操作类实训指导教材，立足于教会自动化专业的学生和从事自动化专业的工程技术人员对当前最先进的自动化设备的使用。东北大学主要承担对驱动类产品的教材编写，在确定了教材的整体规划和内容后，现在罗克韦尔自动化公司任职的王策同学率先对1336系列变频器进行了大量的实验，并完成了大部分内容的整理工作。

随着技术的发展和产品的不断涌现，新的知识结构体系急需建立。于是在罗克韦尔自动化公司传动事业部经理黄建中博士的建议下，着手针对罗克韦尔自动化公司新推出的PowerFlex变频器系列产品进行研究。在经过前期对大量资料翻译的基础上，有目的地从中遴选出有特点的产品功能，并以PowerFlex系列变频器的DEMO实验箱为对象，设计出有针对性的实验题目。力求通过一个个生动的实验例子，采取循序渐进的手段，教会读者一步一步地学会对各种变频器的参数设置和使用。在编写的方式上，尽量做到言简意赅、通俗易懂，避免说教式的长篇大论。刘晓龙先生对本书的编写风格提出了富有建设性的意见，并提供了许多生动的DEMO实验例子。

今天，在东北大学罗克韦尔自动化实验室的老师 and 同学们的努力下，在罗克韦尔自动化公司驱动产品部和大学项目部的积极配合下，终于完成了本书的编写。在编写的过程中，实验室的研究氛围和同学们的团队合作意识有了全方面的提高。特别是计刚同学，对所有的实验题目进行了深入细致的验证，从中得到了极大的锻炼，也增强了自信。因此，这不仅是一本教材，其背后更是一个实验室发生的感人故事。

本书由东北大学钱晓龙主编，黄建中博士主审。全书共分七章，其中赵强负责PowerFlex 4系列变频器的编写，计刚负责PowerFlex 7系列变频器的编写，孙静负责变频器基础知识的编写。本书的所有例子或在实际工程中得到了应用，或在DEMO实验箱上进行了反复实验。罗克韦尔自动化公司的刘晓龙、贾靖民、张轶鸿、熊伟和庄严先生在本书的内容取舍、编写和定稿过程中，提

出了大量的宝贵意见，在此表示最诚挚的谢意。特别感谢朱青青女士长期以来对我们的支持，她以其忘我的工作精神和特有的热情一直在鼓励大家。

感谢东北大学罗克韦尔自动化实验室的同学们，感谢罗克韦尔自动化公司的同仁对本书的编辑和相关实验所做出的辛勤工作。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请广大读者指正。

主编 于东北大学

2006 年 9 月

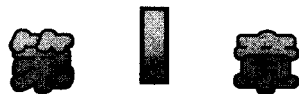
目 录

前言

第 1 章 变频器的介绍	1
1.1 交流调速系统简介	2
1.1.1 概述	3
1.1.2 交流调速原理简介	3
1.2 变频器的工作原理	5
1.3 变频器的控制方式	7
1.4 变频器的容量选择	9
1.5 变频电动机的选择	9
1.6 变频器的外围设备	11
1.6.1 变压器	12
1.6.2 无熔丝低压断路器	13
1.6.3 接触器	13
1.6.4 电抗器	14
1.6.5 EMC 滤波器	16
1.6.6 制动电阻	17
1.6.7 过载继电器	19
第 2 章 变频器的控制方式	21
2.1 U/f 控制方式	22
2.1.1 U/f 控制原理	23
2.1.2 U/f 曲线的类型	24
2.1.3 U/f 控制方式变频器的典型应用	26
2.2 矢量控制方式	27
2.2.1 矢量控制的基本思想	28
2.2.2 按转子磁场定向的矢量控制	30
2.2.3 矢量控制的基本结构	30
2.2.4 矢量控制方式变频器的典型应用	31
第 3 章 PowerFlex 4 系列变频器实验	33
3.1 PowerFlex 4 系列变频器简介	35
3.2 PowerFlex 40 变频器的应用	35
3.2.1 PowerFlex 40 变频器选型	36
3.2.2 PowerFlex 40 变频器的 I/O 端子接线	36
3.2.3 PowerFlex 40 变频器的内置键盘操作	38

3.2.4	PowerFlex 40 变频器的设备级控制实验	41
3.2.5	PowerFlex 40 变频器的 EtherNet/IP 网络控制实验	47
3.2.6	PowerFlex 40 变频器的 DeviceNet 控制实验	53
3.2.7	PowerFlex 40 变频器的多变频器模式	70
3.2.8	PowerFlex 40P 变频器的介绍	84
3.3	PowerFlex 400 变频器的应用	89
3.3.1	PowerFlex 400 变频器的选型	89
3.3.2	PowerFlex 400 变频器的 I/O 端子接线	89
3.3.3	PowerFlex 400 变频器的 Auto/Manual 功能	92
3.3.4	PowerFlex 400 变频器的休眠/唤醒功能	96
3.3.5	PowerFlex 400 变频器的内置 PID 调节功能	97
3.3.6	PowerFlex 400 变频器的一拖多功能	100
3.3.7	PowerFlex 400 变频器的快速启动与断电后重启动功能	103
3.4	PowerFlex 4 变频器的应用	105
3.4.1	PowerFlex 4 变频器的选型	105
3.4.2	PowerFlex 4 变频器的 I/O 端子接线	105
3.4.3	PowerFlex 4 变频器的 Modbus 网络控制	107
第 4 章	PowerFlex 70 变频器	121
4.1	PowerFlex 70 变频器简介	123
4.2	PowerFlex 70 变频器的应用	124
4.2.1	PowerFlex 70 变频器的产品选型指南	124
4.2.2	PowerFlex 70 变频器的硬件接线	126
4.2.3	PowerFlex 70 变频器的内置键盘操作	131
4.2.4	PowerFlex 70 变频器的 DeviceNet 控制	136
4.2.5	PowerFlex 70 变频器的 ControlNet 控制	154
4.2.6	PowerFlex 70 变频器的 EtherNet 控制	161
4.2.7	PowerFlex 70 变频器的计数功能实验	167
4.2.8	PowerFlex 70 变频器的 Auto/Manual 实验	168
4.2.9	PowerFlex 70 变频器的 Peer to Peer 实验	170
4.2.10	PowerFlex 70 变频器的断电后重启动与快速启动功能	175
4.2.11	PowerFlex 70 变频器的转差补偿功能	175
第 5 章	PowerFlex 700 变频器	177
5.1	PowerFlex 700 变频器的介绍	179
5.1.1	PowerFlex 700 变频器简介	179
5.1.2	PowerFlex 700 变频器的产品选型	179
5.2	PowerFlex 700 变频器的 I/O 端子接线	180
5.3	PowerFlex 700 变频器的内置键盘操作	182
5.4	PowerFlex 700 变频器的速度曲线功能	188
5.5	PowerFlex 700 变频器的位置控制功能	197

5.6	PowerFlex 700 变频器数字量输出屏蔽	205
5.7	PowerFlex 700 变频器的高电平数字量输入	206
5.8	PowerFlex 700 变频器的动态用户设置	207
5.9	PowerFlex 700H 变频器的硬件特点	209
5.9.1	11 型框架变频器的电源端子特点	209
5.9.2	12 型框架变频器的电源端子特点	210
5.9.3	PowerFlex 700H 变频器的模拟量 I/O	213
5.9.4	PowerFlex 700H 变频器的硬件使能	213
5.9.5	PowerFlex 700H 变频器的辅助电源	213
第 6 章	PowerFlex 700S Phase II 变频器	215
6.1	PowerFlex 700S Phase II 变频器介绍	216
6.1.1	PowerFlex 700S Phase II 变频器特性简介	216
6.1.2	PowerFlex 700S Phase II 变频器的产品选型	218
6.2	PowerFlex 700S Phase II 变频器的端子	222
6.2.1	PowerFlex 700S Phase II 变频器的电源端子	222
6.2.2	PowerFlex 700S Phase II 变频器的控制端子	224
6.3	PowerFlex 700S Phase II 变频器的内置键盘操作	225
6.4	PowerFlex 700S Phase II 变频器的 Startup	228
6.5	PowerFlex 700S Phase II 变频器的点到点的位置控制实验	229
6.6	PowerFlex 700S Phase II 变频器的步序器实验	235
6.7	PowerFlex 700S Phase II 变频器的齿轮比跟随实验	238
6.8	PowerFlex 700S Phase II 变频器的齿轮比跟随 SynchLink 实验	241
第 7 章	DriveLogix5730 控制器	253
7.1	DriveLogix5730 控制器特性介绍	254
7.2	配置 DriveLogix5730 的本地和远程 I/O	255
7.2.1	DriveLogix5730 连接本地 I/O 的方式	255
7.2.2	配置 DriveLogix5730 的本地 I/O	257
7.2.3	配置 DriveLogix5730 的远程 I/O	260
7.3	配置 DriveLogix5730 直接控制变频器	262
7.3.1	DriveLogix5730 与 PowerFlex700S Phase II 的连接	262
7.3.2	配置 DriveLogix5730 控制 PowerFlex 700S Phase II 处于速度控制模式	262
7.3.3	配置 DriveLogix5730 控制 PowerFlex 700S Phase II 处于运动控制模式	268
附录		278
附录 A	PowerFlex 4/40/400 产品选型表	278
附录 B	AC200~240V、300~380V、600V 变频器及配套件产品目录	282
附录 C	AC208/240V、380/480V、600~690V 变频器及配套件产品目录	289
附录 D	208/240V、380~480V、600/690V 三相变频器、540/650V、 810/932V 直流输入变频器及配套产品目录	294
参考文献		305



变频器的介绍

学习目标

- 了解交流调速系统
- 变频器的工作原理
- 掌握变频器的控制方式
- 变频器的容量选择
- 变频电动机的选择
- 变频器的外围设备

背景

交流变频调速技术是电力电子技术、微电子技术与自动控制技术高度发展的产物。它具有频率范围宽、动态响应快、工作效率高、输出特性好、使用方便等其他调速方案所无法比拟的特点,加上交流电动机对环境适应性强、维修简单、价格低、高速大容量的优势,使得以前的直流电动机占主要地位的调速传动领域,逐渐被交流电动机变频调速所取代。日前,交流变频调速系统正在以其体积小、重量轻、通用性强、保护功能完善、可靠性高、操作简便等优点,在钢铁、有色金属、矿山、石油化工、纺织、电力、机械、建材、轻工、医药、造纸、卷烟和自来水等行业获得广泛的应用。

在传动系统中,电动机作为主要的动力设备而广泛地应用于工农业生产、国防、科技及社会生活等各个方面。电动机负载约占总发电量的 60%~70%,成为用电量最多的电气设备,所以电动机的选择决定了交流变频调速系统的性能优劣。

同时,交流调速系统是否能正常地工作,变频器和电动机是否得到了适当的保护,也取决于是否正确地选择了变频器的外围设备。

掌握这些基本的原理和控制方式,是学习变频器的基础,特别是对交流变频调速系统的设计与分析有很大的帮助。所以本章在阐明交流调速系统和变频器的基本原理的同时,也着重介绍了传动系统中电动机的选择原则及变频器外围设备的选择方法。

1.1 交流调速系统简介

在变频技术日新月异地发展的同时,交流电动机控制技术取得了突破性进展。由于交流电动机是多变量、强耦合的非线性系统,与直流电动机相比,转矩控制要困难得多。20 世纪 70 年代提出的矢量控制理论解决了交流电动机的转矩控制问题,应用坐标变换将三相系统等效为两相系统,再经过按转子磁场定向的同步旋转变换实现了定子电流励磁分量与转矩分量之间的解耦,从而达到对交流电动机的磁链和电流分别控制的目的。这样就可以将一台三相异步电动机等效为直流电动机来控制,因而获得了与直流调速系统同样优良的静、动态性能,开创了交流调速与直流调速相竞争的时代。

通用变频器具有调速精度高、响应快、保护功能完善、过载能力强、节能显著、维护方便、智能化程度高、易于实现复杂控制等优点,已在我国推广普及。变频器的功率从几百瓦到几百千瓦,目前市场上主要是国外生产的变频器,如罗克韦尔自动化、西门子、ABB、安川、富士、台达等公司的产品。这些产品更新换代快,竞争激烈,其总的趋势是向小型化、智能化、多功能、大容量和低价格的方向发展。现代变频器大都采用高速全开关器件,如 GTR (Giant Transistor, 巨型晶体管或电力晶体管)、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor, 绝缘栅双极型晶体管)等,由这些电力电子开关器件组成 PWM (Pulse Width Modulation, 脉冲宽度调制) 电压型逆变器。现代变频器的控制系统要比早先产品复杂得多,而

且是数字化的，它采用微处理器控制，也有的采用 32 位数字信号处理器（Digital Signal Processor, DSP）为实现高级控制和复杂的性能提供了保证。变频器现在作为交流电动机变频调速用的高新技术产品，在国民经济的各部门得到了广泛的应用。

本章首先介绍了交流调速系统普遍应用的背景，通过理论分析阐明为何变频调速成为交流调速系统的主流，然后介绍变频器基本工作原理、控制方式等，使您能够通过本章的学习达到对变频器的初步了解。

1.1.1 概述

众所周知，直流调速系统具有较为优良的静、动态性能指标。在很长的一段历史时期内，调速传动领域基本上由直流电动机调速系统所垄断。直流电动机虽有调速性能好的优点，但也有些固有的难于克服的缺点，主要是机械式换向器带来的弊端。其缺点是：①维修工作量大，事故率高；②容量、电压、电流和转速的上限值均受到换向条件的制约，在一些大容量、特大容量的调速领域中无法应用；③使用环境受限，特别是在易燃易爆场合难于应用。而交流电动机有一些固有的优点：①容量、电压、电流和转速的上限，不像直流电动机那样受限制；②结构简单、造价低；③坚固耐用、事故率低、容易维护。它的最大缺点是调速困难，简单调速方案的性能指标不佳。随着交流电动机调速理论问题的突破和调速装置（主要是变频器）性能的完善，交流电动机调速性能差的缺点已经得到了克服。目前，交流调速系统的性能已经可以和直流调速系统相媲美，甚至可以超过直流调速系统。

在电气调速传动领域内，由直流电动机占统治地位的局面已经受到了猛烈的冲击。目前，从数百瓦级的家用电器直到数千千瓦级乃至数万千瓦级的调速传动装置，都可以用交流调速传动方式来实现。交流调速传动已经从最初的只能用于风机、泵类的一般调速控制过渡到针对各类高精度、快响应的高性能指标的调速控制。从性能价格比的角度看，交流调速装置已经优于直流调速装置。

目前人们所说的交流调速传动，主要是指采用电力电子器件的电力变流器对交流电动机的变频调速传动。除变频器以外的另一些简单的调速方案，例如变极调速、定子调压调速、转差离合器调速等，虽然仍在特定场合有一定的应用，但由于其性能较差，终将会被变频调速所取代。

交流调速传动控制技术之所以发展得如此迅速，和以下一些关键性技术的突破和进展有关，这些技术是电力电子器件（包括半控型和全控型器件）制造技术，基于电力电子电路的电力变流技术，交流电动机的矢量控制技术、直接转矩控制技术，PWM 技术以及以微型计算机和大规模集成电路为基础的全数字化控制技术等。

1.1.2 交流调速原理简介

在异步电动机定子对称的三相绕组中通入对称的三相交流电，此时电动机气隙内会产生一个旋转磁场，其旋转速度为同步转速

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (1-1)$$

式中 f_1 ——定子绕组电源频率；

p ——电动机极对数。
异步电动机转差率

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \tag{1-2}$$

则异步电动机转速

$$n = n_0(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s) \tag{1-3}$$

由电机学可知，转差功率

$$P_s = sP_{em} = p_{Cu2} \tag{1-4}$$

式中 P_{em} ——电磁功率；
 p_{Cu2} ——转子铜耗。

表 1-1 给出了各种调速方法性能指标的比较，以便了解。

表 1-1 异步电动机各种调速方法性能指标的评价

调速方法 比较项目		变极	变频	变转差率			
				调压调速	转子串电阻	电磁转差离合器调速	串级调速
是否改变同步转速 ($n_0 = 60f_1/p$)		变	变	不变	不变	不变	不变
调速指标	静差率(转速 相对稳定性)	小(好)	小(好)	开环时大 闭环时小	大(差)	开环时大 闭环时小	小(好)
	在一般静差率 要求下的调速 范围 D	较小 ($D=2\sim4$)	较大 ($D=10$)	闭环时较大 ($D=10$)	小 ($D=2$)	闭环时较大 ($D=10$)	较小 ($D=2\sim4$)
	调速平滑性	差 (有级调速)	好 (无级调速)	好 (无级调速)	差 (有级调速)	好 (无级调速)	好 (无级调速)
	低速时效率	高	高	低	低	低	中
	适应负载类型	恒转矩 恒功率	恒转矩 恒功率	通风机 恒转矩	恒转矩	通风机 恒转矩	恒转矩
	设备投资	少	多	较少	少	较少	较多
	电能损耗	小	较小	大	大	大	较小
适用电动机类型		多速电动机 (笼型)	笼型	一般为绕线转 子型,小容量 时可采用特殊 笼型	绕线转子型	转差电动机	绕线转子型

由式 (1-4) 可知，变极调速与变频调速为转差功率不变型，不论其转速高低，转差功率消耗基本不变，因此调速效率为最高。在变转差率 s 的调速方法中，定子调压、转子串电

阻及电磁转差离合器这三种调速为转差功率消耗型。因为 $n \downarrow \rightarrow s \uparrow \rightarrow P_s \uparrow$ ，随转速的降低，转差功率将转换成热能消耗掉，所以调速效率最低。串级调速的指导思想是回收转差功率 P_s ，因此它属于转差功率回馈型。在低速时，它的一部分能量消耗在转子中，大部分能量回馈给电网或转化成机械能，调速效率居中。在电力电子技术和计算机控制技术突飞猛进发展的今天，交流调速的主流为变频调速。

1.2 变频器的工作原理

变频器的主要任务就是把恒压恒频（Constant Voltage Constant Frequency, CVCF）的交流电转换为变压变频（Variable Voltage Variable Frequency, VVVF）的交流电，以满足交流电动机变频调速的需要。

变频器的种类很多，通过了解它们的分类，有利于我们认识变频器的性能，这是用好变频器的前提。变频器的种类可以按照以下几种方式划分：按应用领域分，有通用变频器和专用变频器；按结构分，有交-交变频器（直接变频器）和交-直-交变频器（间接变频器）；在交-直-交变频器中，按直流侧电源性质分，有电压源型变频器和电流源型变频器；按输出电压调节方式分，有脉冲幅值调节方式（Pulse Amplitude Modulation, PAM）和脉冲宽度调制方式（PWM）。此外，变频器还可以按照导通模式、输出电压波形、逆变器调制方式等划分为许多种类。我们通常使用的通用型变频器大多为交-直-交 PWM 电压型变频器，下面将以此类变频器为例进行介绍。

交-直-交变频器是把频率不变的工频交流电通过整流器变成直流电，然后再把直流电转换成频率、电压均可变的交流电，它的主电路由整流器、中间直流环节（直流母线）和逆变器组成，如图 1-1 所示。

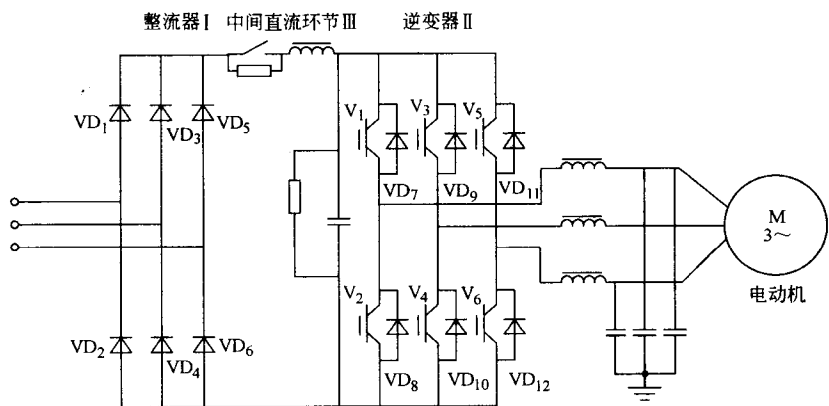


图 1-1 变频器的基本构成

1. 整流器

电网侧变流器 I 是整流器，它的作用是把三相（也可以是单相）交流电整流成直流电。图 1-1 中的整流单元是由 $VD_1 \sim VD_6$ 组成的三相整流桥，它们将工频 380V 的交流电整流成直流电，平均直流电压可用式（1-5）表示：

$$U_D = 1.35U_L = 1.35 \times 380V = 513V \tag{1-5}$$

式中 U_L ——电源的线电压 (V)。

变频器中整流器采用图 1-1 所示的二极管不可控桥式整流电路方案的占绝大多数。当逆变器采用 PWM 方式的情况下,这是一种较好的方案。与晶闸管整流器相比,这种方案在全速度范围内网侧功率因数比较高。由于不必设置相应的控制电路,所以控制简单,成本也较低。

二极管桥式整流电路的工作原理十分简单,不必深入分析。这里主要就其用于变频器中的一些技术问题进行必要的说明。理论上讲,二极管整流器侧功率因数应该接近于 1,但实际上,由于中间直流回路采用大电容作为滤波,其值小于 1。整流器的输入电流实际上是电容器的充电电流,呈较为陡峻的脉冲波,其谐波分量较大。虽然其基波功率因数 $\cos\varphi_1$ 接近于 1,但总功率因数却不可能是 1。谐波电流造成的不良影响简述如下:

- (1) 占用电网容量。一般情况下应考虑电源设备的裕量。
- (2) 引起电网电压波形畸变。电网容量越大,电流波形越陡峻,畸变越严重。与此相反,电网容量相对较小,电压波形的畸变较严重。同时畸变程度与变频器的负载大小有关。由于电流、电压波形的畸变,供电线路上的其他设备必然受到影响,引起过热、噪声、振动甚至误工作。变频器的应用日益增多,对电网的污染问题不容忽视。
- (3) 对改善功率因数用的电力电容器产生不良影响。当变频器单机容量或总容量较大时,这种影响便会显现出来。一旦由于谐波而引起并联谐振,电力电容器流入异常大的电流,引起过热或绝缘而损坏。这种情况下,谐波电流的幅值将特别大,危及电力电容器的安全。

2. 逆变器

负载侧的变流器 II 为逆变器。最常见的结构形式是利用六个半导体主开关器件组成的三相桥式逆变电路。有规律地控制逆变器中主开关器件的通与断,可以得到任意频率的三相交流电输出。图 1-2 中,由 $S_1 \sim S_6$ 组成了三相逆变桥, S 导通时相当于开关接通, S 截止时相当于开关断开。

三相逆变电路的原理图如图 1-2 所示。

图 1-2a 中, $S_1 \sim S_6$ 组成了桥式逆变电路,这 6 个开关交替地接通、断开就可以在输出端得到一个相位互差 $2\pi/3$ 的三相交流电压。当 S_1 、 S_4 接通时, u_{U-V} 为正; S_3 、 S_2 接通时, u_{U-V} 为负。用同样的方法可得: S_3 、 S_6 同时接通与 S_5 、 S_4 同时接通,得到 u_{V-W} , S_5 、 S_2 同时接通与 S_1 、 S_6 同时接通,得到 u_{W-U} 。为了使三相交流电 u_{U-V} 、 u_{V-W} 、 u_{W-U} 在相位上依次相差 $2\pi/3$;各开关接通、断开需符合一定的规律,其规律在图 1-2b 中已标明。根据该规律可得 u_{U-V} 、 u_{V-W} 、 u_{W-U} 波形如图 1-3 所示。

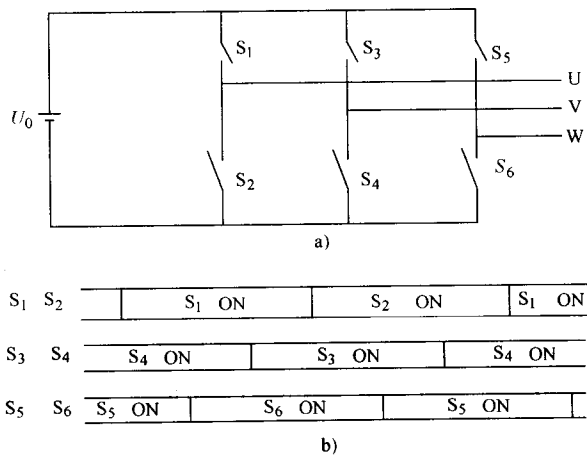


图 1-2 三相逆变电路的原理图

观察 6 个开关的位置及波形图可以发现以下两点：

(1) 同一桥臂上的开关如 S_1 、 S_2 始终处于交替接通、断开的状态。

(2) 各相的开关顺序以各相的“首端”为准，互差 $2\pi/3$ 电角度。如 S_3 比 S_1 滞后 $2\pi/3$ ， S_5 比 S_3 滞后 $2\pi/3$ 。

上述分析说明，通过 6 个开关的交替工作可以得到一个三相交流电，只要调节开关的通断速度就可调节交流电频率，当然交流电的幅值可通过 U_d 的大小来调节。

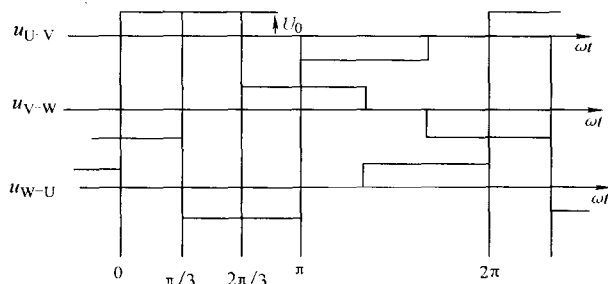


图 1-3 三相逆变电路导通时序图

现在常用的逆变管有绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)、大功率晶体管 (GTR)、门极关断晶闸管 (GTO) 晶闸管、功率场效应晶体管 (MOSFET) 等。其中续流二极管 ($VD_7 \sim VD_{12}$) 有下面几个功能：

(1) 由于电动机是一种感性负载，工作时其无功电流返回直流电源需要 $VD_7 \sim VD_{12}$ 提供通路。

(2) 降速时，电动机处于再生制动状态， $VD_7 \sim VD_{12}$ 为再生电流提供返回直流的通路。

(3) 逆变时， $VD_7 \sim VD_{12}$ 快速高频率地交替切换，同一桥臂的两管交替地工作在导通和截止（阻断）状态，在切换过程中，也需要给线路的分布电感提供释放能量的通路。

3. 中间直流环节

由于逆变器的负载为异步电动机，属于感性负载。无论电动机处于电动或发电制动状态，其功率因数总不会为 1。因此，在中间直流环节和电动机之间总会有无功功率的交换。这种无功能量要靠中间直流环节的储能元件（电容器或电抗器）来缓冲。所以又常称中间直流环节为中间直流储能环节。

1.3 变频器的控制方式

当对异步电动机调速时，需要根据电动机的特性对供电电压（电流）和频率进行适当控制，采用不同的控制方法所得到的调速性能、特性和作用是不同的。

变频器所采用的控制方式可按系统结构分为两类：开环控制和闭环控制。开环控制主要是 U/f 协调控制。闭环控制需要速度等反馈信息，可进行转差频率控制、矢量变换控制等。变频器的控制方式是按 U/f 控制、转差频率控制、矢量控制的顺序发展起来的，越是后来的控制方式其性能越优良。特别是矢量控制技术，可以实现与直流电动机传动系统相当的调速性能。当然，先进的控制方式其控制比较复杂，需要专门的知识，同时需要调整的因素多，变频器的价格也比较高。目前各种控制方式的变频器已产品化，我们可根据调速目的、用途和调速系统所需的性能指标选择合适的控制方式的变频器，以构成性价比高的交流调速系统。

按照变频器控制方法的难易程度和算法的不同，变频器的控制方式可分为 U/f 控制

方式:

无速度传感器矢量控制方式和磁场定向矢量控制方式。

1. U/f 控制方式

这种控制方式经常应用于简单的开环频率控制应用场合，而不能控制任何在矢量技术中特有的组成部分。 U/f 变频器调节电动机的实际频率，从而产生期望速度。大多数的 U/f 变频器不能区分磁通电流与转矩电流，而只能以满电动机电流进行处理。这种变频器依赖于简单的电流限制策略，通常使用增加电压提升的方法来产生更大的起动转矩。尽管这种电压提升能够提供额外的起动转矩，它却需要更大的电流，并且经常会发生“电流限制”的情况，从而使得性能变差。 U/f 技术看起来类似于矢量控制，但通过实际运行的对比可以发现，几乎在所有的领域中都显现了“无矢量控制”的性能，包括起动、加速、低速运行情况以及转矩控制时。

2. 无速度传感器矢量控制方式

这种方式提供了一种性能介于 U/f 控制方式与纯磁场定向控制方式之间的控制方式。无速度传感器或者开环矢量控制可以提供较大的起动、加速以及冲击负载转矩，较宽的恒转矩调速范围（包括基本速度），并且还可以改善低速性能，但是它并不是转矩控制变频器，因此不能调节电动机中产生的转矩量。它们也无法挑战磁场定向矢量控制在动态响应、高性能速度调节或调速范围方面的卓越性能。它所能做到的是给电动机每安培提供更高的转矩。通过建立满足子磁通并不断观测估算“过磁通”状况，无速度传感器矢量控制可以提供用户所需的最大电动机转矩（接近衰减）。这包括所有苛刻性工作领域，如脱扣、加速和减速、冲击性负载，低速和“弱磁”或基速以上工作场合。

3. 磁场定向矢量控制方式

这种方式由于既控制电流环节组成部分（磁通电流和转矩电流）又控制它们之间的夹角（矢量和），因此它既可以调节速度，又可以调节转矩。这种变频器提供良好的转矩特性以及更严格的速度调节、更宽的调速范围和更高的响应带宽。专用的自适应控制器提供了独立的转矩与磁通控制，从而允许对电动机速度和转矩的连续调节。

以上各种控制方式的控制性能比较如表 1-2 所示。

表 1-2 三种控制方式的控制性能比较

控制方式 控制性能	U/f 控制	无速度传感器矢量控制	磁场定向矢量控制
速度控制	频率控制 转差补偿	频率控制转差补偿 编码器反馈	速度控制 编码器反馈
速度调节	1%	转差补偿 0.5% 编码器 0.1%	开环 0.5% 闭环 0.001%
转矩调节	—	—	取决于电动机 2%~5%
调速范围	40 : 1	120 : 1	开环 120 : 1 闭环 > 1000 : 1