

高等职业技术教育机电类专业规划教材

电气传动控制系统 设计指导

主编 李荣生



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高等职业技术教育机电类专业规划教材

电气传动控制系统设计指导

主 编 李荣生
副主编 刘泉海 马 宁
参 编 王福成
主 审 贾济雨 乔启瑞



机械工业出版社

本书是集电气传动控制系统工程设计和应用于一体的高等技术教育实践性教材。全书取材既反映了当前电气传动控制技术先进性、实用性,又兼顾了经典传动控制基本内容。主要内容包括:电气传动控制系统设计概述,变流器工程设计,双闭环调速系统工程设计,变频调速控制系统选型设计,单片微机控制调速系统设计。

全书以工程设计与具体应用作为主线贯穿始终。一方面介绍电气传动控制系统工程设计步骤和方法,如控制系统方案确定、元器件参数计算和选择等;另一方面注重工程实践的具体应用,如控制系统运行、调试和设计举例,能够较好适用于电气自动化应用性本科、高职高专学生课程设计和毕业设计需要及电气自动化、机电类学生学习参考,同时对于现场从事电气传动控制工程技术人员也有一定参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电气传动控制系统设计指导/李荣生主编. —北京:机械工业出版社, 2004.6

ISBN 7-111-14499-6

I. 电... II. 李... III. 电力传动—控制系统 IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 045694 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王保家、王玉鑫

责任编辑:王玉鑫 版式设计:张世琴 责任校对:张媛

封面设计:解辰 责任印制:李妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·13.75 印张·339 千字

定价:20.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着我国现代化建设的高速发展,电气传动自动化技术在各领域的应用范围不断扩大,并正以日新月异的速度更新换代。然而,对于电气自动化专业的学生,在学完相应课程之后,往往因缺乏工程实践知识,很难完成电气传动控制系统的工程设计,不会进行系统调试和故障分析。为了适应高等职业技术教育的急需,较好反映当前电气传动自动化技术发展、应用而编写本书。试图以此填补学生知识结构上的鸿沟及弥补现有教材的缺陷。

本书的特点:以体现技术的实践性、先进性和针对性为主,在介绍电气传动控制系统工程设计步骤和方法的基础上,结合不同内容介绍系统在生产现场具体应用与调试等。考虑到读者对学科基本理论需求,对电气传动控制系统构成、原理作了一般性的介绍。由于本书属于工程设计指导用书,在内容上适量列入部分设备(器件)技术数据,便于相关人员查阅。

本书编写人员及分工:山西工业职业技术学院李荣生(第一章、第四章),并负责全书的组稿和定稿;陕西工业职业技术学院刘泉海(第二章);山西工程职业技术学院马宁(第三章);山西工业职业技术学院王福成(第五章)。

全书由太原理工大学贾济雨、乔启瑞两位教授负责主审并提出修改意见。黄家善老师对本书大纲提出有益建议,在此一同表示诚挚的谢意。

本书在为适应电气自动化技术发展、应用及高等职业技术教育做出尝试,限于技术资料有限,编者专业水平不高,恳请使用本书的读者批评指导。

编者

2004年3月

目 录

前言

第一章 电气传动控制系统设计概述 1

第一节 电气传动控制技术发展概况 1

第二节 电气传动控制系统构成原理 4

第三节 电气传动控制系统设计任务及要求 14

第四节 设计图样的有关规定 16

第二章 变流器工程设计 19

第一节 变流器工程设计准备 19

第二节 晶闸管整流主电路的选择 22

第三节 整流变压器选择 26

第四节 整流器件选择 31

第五节 平波和均衡电抗器选择 37

第六节 晶闸管的保护设计 40

第七节 触发驱动装置选择 45

第八节 变流器电压电流检测 48

第九节 整流设备的功能指标 51

第十节 晶闸管变流器运行调试 57

第十一节 变流器工程设计举例 62

第三章 双闭环调速系统工程设计 67

第一节 转速、电流双闭环调速系统设计准备 67

第二节 系统方案的确定 72

第三节 控制系统数学模型的建立和稳态参数计算 79

第四节 直流调速系统的工程设计方法 83

第五节 电流调节器的设计 92

第六节 转速调节器的设计 95

第七节 控制系统动态性能指标评估 98

第八节 双闭环调速系统的调试与 工作过程分析 104

第九节 双闭环调速系统设计举例 110

第四章 变频调速控制系统选型 设计 116

第一节 变频调速控制系统选型设计 概述 116

第二节 负载机械特性 118

第三节 变频器选择 125

第四节 变频器配套设备选择 130

第五节 变频器供电设备选择 135

第六节 变频器的安装和使用 137

第七节 可编程控制器的选择及 应用 143

第八节 变频调速控制系统的调试 与维护 148

第九节 变频调速系统设计举例 156

第五章 单片机控制调速系统设 计 160

第一节 单片机调速系统概述 160

第二节 主电路器件选用 166

第三节 MCS-51 单片机系统扩展 174

第四节 数字调节器的设计 183

第五节 数字触发器的设计 188

第六节 PWM 控制信号的生成 191

第七节 控制对象检测信号的转换 194

第八节 电动机的单片机控制设计 举例 200

参考文献 215

第一章 电气传动控制系统设计概述

第一节 电气传动控制技术发展概况

电气传动控制技术是以生产机械的驱动装置——电动机为控制对象，以微电子装置为核心、以电力电子装置为执行机构，在自动控制理论、信息传输理论指导下组成电气传动控制系统，控制电动机的转速按给定的规律进行自动调节，使之既满足生产工艺的最佳要求，又具有提高效率、减少能耗、提高产品质量、降低劳动强度的最佳效果。然而，电气传动控制技术又是一门多学科、多行业交叉的新兴产业及技术领域。随着微型计算机、超大规模集成电路、新型电力电子器件和传感器出现以及自动控制理论、计算机辅助设计、诊断技术和数据通信技术的深入发展，它正以日新月异的速度迅速更新换代，从而使电气传动控制技术进入了新的发展时代。

电气传动控制技术广泛应用于国防、能源、交通、冶金、煤炭、化工、港口等领域。纵观各国近代工业发展史，放眼现代工业发展的新潮流，人们越来越认识到电气传动控制技术是现代化国家的一个重要技术基础。可以认为：大到一个国家，小到一个工厂，它具有的电气传动控制技术水平可以反映出其现代化水平。

一、电气传动控制技术国内外发展概况

电气传动是指以各类电动机为动力的传动装置与系统。依据电动机种类不同，分为直流电动机、交流电动机、步进电动机、伺服电动机传动等。自从 1957 年晶闸管问世，便开始了它在工业上的应用。从 20 世纪 70 年代起，晶闸管变流器供电直流电动机（称 V-M）调速系统已成为直流调速系统的主要形式。它以单相、三相或更多相数组成的半波、全桥等类型，通过调节触发装置的控制电压来移动触发脉冲相位，即可改变整流电压，从而实现平滑调速。由于直流传动控制系统具有良好的起动、制动、正反转及调速性能，并能够实现电动机四象限运行和自动控制。因此，由晶闸管变流器供电直流电动机调速系统至今仍在电气传动领域中占有相当地位。

电力电子技术和电力电子器件的发展对电气传动控制技术的进步影响极大。从 20 世纪 70 年代末期，随着全控式电力电子器件——门极关断（GTO）晶闸管、电力晶体管（GTR）、电力场效应晶体管（Power MOSFET）不断出现并投入应用，使直流传动控制系统得到了新的发展。尤其用大功率晶体管（GTR）构成的直流脉宽调制（PWM）调速系统和直流斩波调速系统，与 V-M 系统相比，主电路线路简单，需用的功率器件少；开关频率高，电流容易连续；谐波少，电动机损耗和发热较低及调速范围大等。例如，利用 GTR 的直流电动机 PWM 调速系统的最大调速比可达 1:1000，而用普通晶闸管系统的最大调速比约为 1:100。20 世纪 80 年代后期产生的绝缘栅双极型晶体管（IGBT）、MOS 控制晶闸管（MCT）等，形成第三代电力电子器件，它克服 GTR 驱动功率大、开关频率不足的缺点。近年来，出现了号称第四代的功率集成电路，它是电力电子技术和微电子技术相结合的产物，即将电

力电子器件与驱动电路、逻辑控制电路、检测和诊断电路、保护电路集成在一块芯片上，使电力电子器件含有某种智能功能，故又称为智能电力电子集成电路（PIC）。电力电子器件发展另一个方向是新型智能功率模块（IPM），它是将多个（或单个）电力电子器件组成半控桥或全控桥，并集成了快速恢复二极管、栅极或基极驱动电路、保护电路，而形成混合模块。

值得注意：电力电子器件发展带来了交流调速传动技术发展的新时代。从 20 世纪 80 年代初，采用 PWM 控制技术的交流变频传动调速装置研制成功，先后出现循环变流器供电、电压或电流型 6 脉波逆变器供电及 IGBT 的 PWM 逆变器供电的交流变频调速传动，至今已得到了普遍应用。截止 20 世纪末，工业发达国家交流调速已占据主导地位。回顾交流调速传动发展过程，大致沿着三个方向发展：一是取代直流调速实现少维修、省力化为目标的高性能交流调速；二是以节能为目的改恒速为调速，适用于风机、泵类等通用机械的交流调速；三是代替直流调速，实现特大容量、高电压、高转速的交流调速。

交流调速方式是按照交流电动机转速公式建立的。理论上讲，改变磁极对数、转差率和调节频率都可以实现调速，但对于同步电动机在运行中改变磁极对数会引起失步，因而只能采用调频调速；对于异步电动机，以上三种方法虽都可采用，而变磁极调速为有级调速，改变转差率又是耗能型调速，只有变频调速是最为理想的调速方法。由于电力网中应用最普遍的是笼型异步电动机和同步电动机，因此变频调速成为交流调速中最理想、最有发展前途及发展最快的技术。目前国内外普遍生产及应用的是 IGBT（或 BJT）的 PWM 逆变器供电低压通用变频器（国内几乎所有的产品都是普通的 V/F 控制），而国内所应用 3~10kV 中高压变频器多数是国外技术或国内少数科研单位制造的。未来变频器的技术发展方向：主电路的最新技术是追求变频器的小型化和低发热，开始并普遍应用 IPM，为降低电动机产生的噪声，常把开关频率提高到 10~20kHz；最新的控制技术是采用 32 位微处理器实现控制高速化；采用系统化的对应技术，即变频器与系统或网络相连接；开发清洁电能的变频器。

变频器种类主要有交-交变频器与交-直-交变频器两种，而交-直-交变频器按直流电源型式不同可分为电流型和电压型。主要特点比较见表 1-1 和表 1-2。目前应用较为普遍的属电压型 PWM 方式的交-直-交变频器。

表 1-1 交-交变频与交-直-交变频主要特点比较

变频器类型 比较项目	交-交变频	交-直-交变频
换能形式	一次换能，效率较高	两次换能，效率略低
换流方式	电网电压换相	强迫换相或负载换相
装置器件数量	器件较多，器件利用率较低	器件较少，器件利用率较高
调频范围	最高频率为电源频率有 $1/3 \sim 1/2$	频率调节范围宽，不受电源频率限制
电网功率因数	较低	移相调压，低频低压时功率因数低，用斩波或 PWM 调压时功率因数高

表 1-2 电流型变频与电压型变频主要特点比较

变频器类型 比较项目	电 流 型	电 压 型
直流回路滤波环节	电抗器	电容器
输出电压波形	决定于负载，当负载为异步电动机时，为近似正弦波	矩形波
输出电流波形	矩形波	决定于逆变器电压与电动机的电动势，有较大谐波分量
输出动态阻抗	大	小
再生制动	方便，不需附加设备	需要附加电源侧反并联逆变器
过电流及短路保护	容易	困难
动态特性	快	较慢，用 PWM 则快
对晶闸管要求	耐压高，对关断时间无严格要求	一般耐压可较低，关断时间要求短
电路结构	较简单	较复杂
适用范围	单机，多机	多机，变频或稳频电源

二、电气传动的 PWM 控制技术

PWM 控制技术是利用电力电子开关器件构成变换器，利用其导通与关断把直流电压变成电压脉冲列，并通过控制电压脉冲宽度和脉冲列的周期以达到变压变频目的一种控制技术。

在直流调速系统中，PWM 变换器通常用全控型电力电子器件构成，通过改变器件的导通与关断时间，调节加在电动机两端直流电压平均值（占空比），同时利用电动机电枢回路电感储能放电使电枢电流连续。在交流变频调速传动中，变频的同时也必须协调地改变电动机的电压，否则电动机将出现过励磁或欠励磁。为此，用于交流电气传动中的变频器实际上是变压变频器（称 VVVF）。VVVF 控制技术分为两种：一种是把 VV 与 VF 分开完成，即在把交流电整流为直流电的同时进行相控调压，而后将直流再变为可调频率的交流电，前者用来改变直流电压的幅值，后者用来改变频率，这种前后分开控制的 VVVF 控制技术称为脉冲幅值调制，称为 PAM 方式；另一种是将 VV 与 VF 集中于逆变器一起来完成，前面为不可控整流器，中间直流电压恒定，后面部分逆变器同时完成变压和变频，这种控制技术称为脉冲宽度调制，称为 PWM 方式。

对于 PWM 控制技术，从控制思想上可分成四类：即等脉宽 PWM 法、正弦波 PWM 法（SPWM 法）、磁链跟踪型 PWM 法和电流跟踪型 PWM 法。其中前三种都是控制输出电压的电压型逆变器，而后者虽然也采用电压型逆变器的主电路结构，却是控制输出电流型逆变器。电气传动的 PWM 控制技术是调速传动的关键技术，是电气传动自动控制技术领域热点。PWM 控制信号的产生方法有以下四种：

1) 分立器件组成的 PWM 信号发生器，它是最早的方式，现在已被淘汰。

2) 软件模拟法，利用单片机的一个 I/O 引脚，通过软件对该引脚不断地输出高低电平实现 PWM 波输出。这种方法因占用 CPU 大量时间，使单片机无法进行其他工作，因此也逐渐被淘汰。

3) 专用 PWM (SPWM) 集成模块, 这些芯片除了能产生 PWM 信号外, 还有“死区”调节功能、保护功能。

4) 单片机的 PWM 口, 单片机通过初始化设置, 使其能自动地发出 PWM 波。

三、计算机控制电力传动技术

为实现电气传动综合自动控制, 已用单片机作为电动机的控制器, 使电路更简单, 可以实现较复杂的控制, 灵活性和适应性强、无零点漂移、控制精度高及可提供人机界面、多机连网工作。新型单片机已将 16 位的性能下移到 8 位, 在内部增加了如 PWM 口、比较和捕捉功能、A/D 转换等, 并增加了看门狗、各种串行总线接口等功能, 使新一代单片机功能更强大。除了单片机作为控制器之外, 实际中可作为控制器的还有工业控制计算机、可编程序控制器 (PLC)、数字信号处理器 (DSP)。

工业控制计算机可谓功能较为强大, 它有极高的速度、强大的运算能力和接口功能、方便的软件环境, 但由于成本高、体积大, 所以只用于大型控制系统。

可编程序控制器虽只能完成逻辑判断、定时、计数和简单运算, 但由于编程简单而得到普遍应用。

数据信号处理器是近年来涌现的一个后起之秀, 这些芯片不但具有高速信号处理能力和数字控制功能, 而且还有电动机控制应用所必需的外围功能, 如 PWM 输出、A/D 转换器及可编程死区控制功能等。在电动机控制系统中采用专用的 DSP, 可以实现矢量控制、直接转矩控制等功能。

常规控制系统是连续控制系统, 它连续不断地测量并经反馈以及补偿后, 对生产过程产生连续不断的控制; 使用微处理器的计算机控制是采样 (数字) 控制系统, 它与连续式电气传动系统主要区别是由计算机来取代原运算放大器实现的控制器与比较器。计算机每隔一个采样周期便对被控参数进行一次测量, 根据一定控制规律计算出控制量后去控制生产对象或生产过程。计算机控制系统的特点: 实时数据采集, 对被控参数的瞬时值进行测量; 实时决策, 对表征被控参数状态的测量值进行分析, 并按已确定好的控制规律做出相应的控制决策; 实时控制, 根据决策对实时控制机构发出控制信号。

第二节 电气传动控制系统构成原理

电气传动控制系统种类很多, 本书就下面几种构成原理作以介绍。

一、晶闸管整流电气传动控制系统的构成原理

晶闸管整流电气传动控制系统主要利用改变晶闸管导通角调节直流电动机供电电压。这种系统常带有电压反馈、电流反馈与速度反馈的闭环系统, 可以获取较宽的调速范围和很高的稳态动态指标。晶闸管整流电气传动控制系统中的调速系统属于恒值调节范畴, 而位置控制系统则往往属于随动系统范畴, 对于它们常常用到按偏差调节和按扰动调节这样两个原则。这类系统在动态过程中往往会发生某些中间变量超出容许值的情况 (对调速系统, 电压和电流是中间变量, 对随动系统, 速度是中间变量), 这就必须根据工艺要求和传动机构, 对电动机承受的外力加以限制, 以保证可靠工作。从这一要求出发, 控制系统按结构分为两

类。

(一) 带有截止负反馈的单闭环系统

在单闭环系统中附加一些中间变量的负反馈，一旦这些中间变量达到极限允许值，这些附加反馈立即投入工作。如果某一附加反馈的传递系数大到使外环的反馈可以忽略的程度，就可约束中间变量。这种方法的缺点在于按单环系统选择惟一的一个调节器，难以使它具有良好的动态特性。这类系统的典型应用是单闭环调速系统中加入附加电流截止负反馈，如图 1-1a 所示。这种系统的静特性和动特性都不理想。静特性运行段不硬（转速随负载变化大），下垂段又不陡（到一定负载时不能使转速陡然下降）。动特性不能保证在动态过程（起动和制动等）中，电流一直保持最大允许值，以提供最大加速度，稳态时电流又立即降下来。因此，这种系统稳速精度不高，起制动过程较慢，影响生产效率，只适于要求不高的场合。

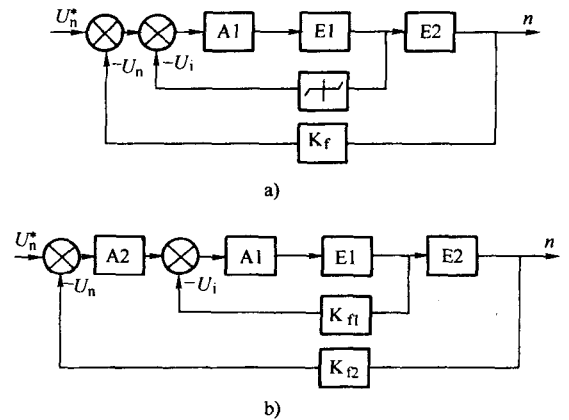


图 1-1 电气传动系统结构框图

(二) 按从属调节原理构成的多闭环系统

针对上述控制方案的不足，在系统中设置多个调节环，各环都有自己的调节器 A、它们分别对不同参数进行调节，如图 1-1b 所示。其中外环调节器的输出电压作为内环调节器的给定值，并且这一输出电压受到外环调节器限幅值的限制，使内环的输出不会超过与此限幅值相应值，两值相差一个反馈系数 K_{fi} ，从而达到约束中间变量的目的。由于每个环对相应参数的调节从属于它的外环，故称为从属调节原理。

这种系统的设计从内环开始逐步向外环进行，每个环的设计如果按所谓“二阶最佳”参数选择，则闭环系统传递函数为

$$\phi(s) = \frac{1 - K_{fi}}{2T_{\mu i}s^2 + 2T_{\mu i}s + 1} \quad (1-1)$$

式中 $T_{\mu i}$ ——第 i 个环的总小时间常数。忽略高次项，有

$$\phi(s) = \frac{1/K_{fi}}{2T_{\mu i}s + 1} \quad (1-2)$$

因此，在设计外环时，可将内环等效视为一个惯性环节，其等效时间常数为 $2T_{\mu i}$ 。如果等效时间常数与外环大时间常数相比足够小，又可将它合并到外环的总小时间常数中去，再次按“二阶最佳”参数设计外环。由此可见，这种系统的设计和调整是极其简单的，并能获得规范特性。由于每个环的等效时间常数都是其小时间常数的两倍，当外环无其他小时间常数时，第二环等效时间常数 $T_{e2} = 2 \times 2T_{\mu i} = 4T_{\mu i}$ ，第 n 环的等效时间常数为 $T_{en} = 2^n T_{\mu i}$ 。随着环数的增多，等效时间常数越来越大，考虑到每个环自身存有小时间常数，这个增大过程还要加剧，导致截止频率过小，这是从属调节系统的主要缺点。正因如此，在直流调速系统中广泛采用转速、电流双闭环进行控制，具体构成原理参阅第三章内容，在此不再叙述。

二、直流 PWM 控制系统构成原理

直流 PWM 控制系统是直流脉宽调制式调速控制系统的简称，与晶闸管直流调速系统的区别在于用直流 PWM 变换器取代了晶闸管变流装置，作为系统的功率驱动器，系统构成原理如图 1-2 所示。其中属于脉宽调制调速系统主要由调制波发生器 GM、脉宽调制器 UPM、逻辑延时环节 DLD 和电力晶体管基极的驱动器 GD 和脉宽调制 (PWM) 变换器组成。最关键的部件为脉宽调制器。

模拟式脉宽调制器本质为电压-脉冲变换装置，它是由一个运算放大器和几个输入信号构成电压比较器。运算放大器工作在开

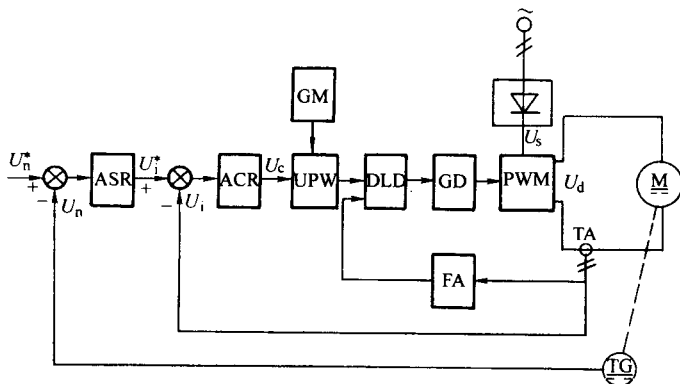


图 1-2 直流 PWM 传动系统结构图

环状态，在电流调节器的输出控制信号 U_c 的控制下，产生一个等幅、宽度受 U_c 控制的方波脉冲序列，为 PWM 变频器提供所需的脉冲信号。脉宽调制器按所加输入端调制信号不同，可分为锯齿波脉宽调制器、三角波脉宽调制器。目前应用较多脉宽调制信号由数字方法来产生，如专用集成 PWM 控制电路及单片微机所构成的脉宽调制器。

脉宽调制变换器多采用由全控型电力晶体管构成 H 形双极性可逆控制电路，它将脉宽调制脉冲序列进行电流、电压放大，推动执行电动机转动。图 1-2 中逻辑延时环节 DLD 保证在对一个管子发出关断脉冲时，经延时后再发出对另一个管子的开通脉冲。在延时环节中引入瞬时动作限流保护 FA 信号，一旦桥臂电流超过允许最大电流值时，使工作管子同时封锁，以保护电力晶体管。应当注意：PWM 变换器输出电压 U_d 为正、负幅度等于电源电压 U_s 的矩形脉冲，脉冲的频率和宽度与 U_c 有关。输出电压中含有直流分量和各次谐波分量，电动机将在各谐波分量作用下强迫振动，实现“动力润滑”。当设计脉冲频率比电动机固有频率高得多时，振幅十分小，所引起的转速误差和角误差可忽略不计。真正起作用的仍是直流分量，电动机转速的大小和方向取决于输出电压的大小和极性。

直流 PWM 调速系统设计中应考虑主要问题：根据系统的要求，合理地确定脉宽调制器的工作振荡频率 f_s ；确定脉宽调制变换器的主电路的形式和选择大功率晶体管的参数。

顺便指出，直流 PWM 调速系统是一个采样控制系统，但只要开关频率 $f_s \geq (4 \sim 6)f_c$ (f_c 为电流环的开环截止频率)，则直流 PWM 调速系统与连续系统完全等效，直流 PWM 调速系统仍然可按一般双闭环系统工程方法进行。

三、变频调速控制系统构成原理

变频调速控制系统的核心是变频器。变频器通常指由三相或单相交流输入、三相交流输出的电力电子装置。三相变频器可同时完成变压和变频（称 VVVF），其控制方式分作 PAM 和 PWM 两种。其中 PAM 控制方式变频器称为 PAM 变频器，主电路开关器件一般采用半

控型器件（如 SCR^①），主要用于大中容量变频器中；PWM 控制方式变频器称为 PWM 变频器，主电路开关器件多采用全控型器件（如 IGBT），在中小容量通用型变频器中普遍应用。通用变频器的通用一词有两方面含义：一是这种变频器可用以驱动通用型交流电动机；二是具有各种可供选择的功能，从而适应于多种不同性质负载机械。图 1-3 所示为交-直-交通用型 PWM 变频器原理框图。这是一种转速开环的 PWM 变频调速系统，主要由主电路和控制电路两部分构成，下面介绍各部分的构成原理。

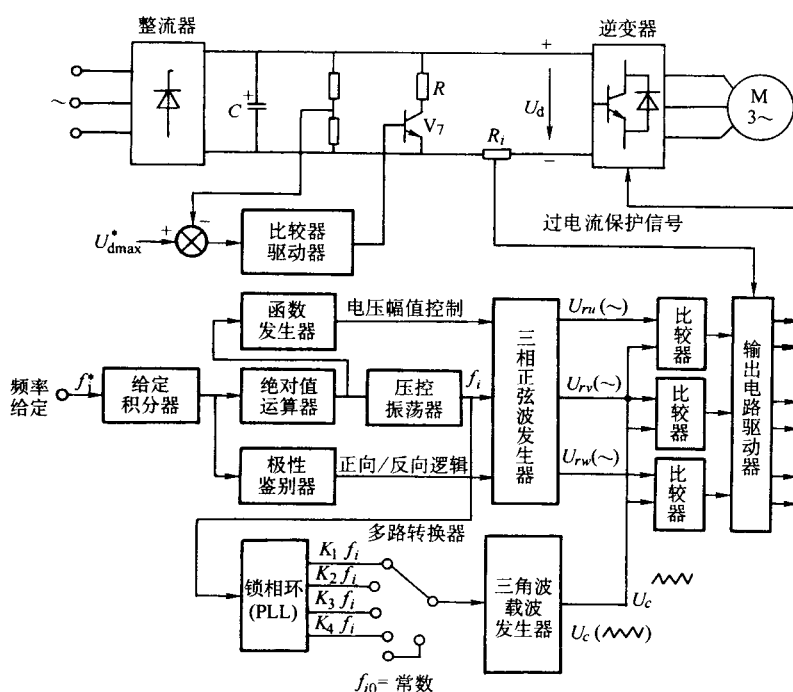


图 1-3 通用型 PWM 变频器原理框图

（一）主电路

主电路由整流器、能耗制动电路和逆变器三部分组成。

1. 整流器

在电压型通用 PWM 变频器中，整流部分大多采用不可控整流二极管或二极管模块，输入电压为单相 220V 或三相 380V。整流电路输出电压是脉动的直流电压，必须加以滤波。电压型通用 PWM 变频器的直流电路，一般采用电容器滤波。滤波电容器电容较大，通常由若干个电容并成一组，又由两组串联而成，因而使直流电压波形比较平稳。在理想情况下，可把它视为一种内阻抗为零的恒压源，输出交流电压为矩形波或梯形波。由于电容器电容量大，加之在接入电源时电容两端电压为零，所以接通电源瞬间产生很大充电电流，为限制充电电流，通常应在整流桥输出端与电容器之间串接一个限流电阻（图中未画）。

2. 能耗制动电路

在变频调速控制系统中，电动机的降速和停机是通过减小频率来实现的，由于负载机械

① 普通晶闸管（Thyristor）曾称为硅可控整流器（SCR，简称可控硅），为方便起见往往仍沿用 SCR 表示普通晶闸管）。

惯性原因,电动机转速尚未改变,于是电动机处于发电、制动状态,电动机再生电能由续流二极管全波整流后反馈到直流电路。由于直流电能无法回馈给电网仅靠滤波电容吸收,尽管各部分电路在续流时仍在消耗电能,但电容上仍有短时间电荷积累,形成“泵生电压”。使直流电压升高,导致部分器件损坏。能耗制动电路作用是当直流电压超过一定值时,经过控制电路(如图 1-3 中比较器、驱动器使 V_7 管导通)由其提供一条放电回路,将再生电能消耗掉。

3. 逆变器

交-直-交变频器中,逆变器一般接成三相桥式电路,如图 1-4 所示。

根据三相逆变桥电力电子器件驱动的 PWM 信号不同,三相变频器可为等脉宽 PWM 控制、SPWM 控制、磁链跟踪型 PWM 控制及电流跟踪型 PWM 控制技术。

等脉宽 PWM 控制是在六拍逆变器基础上提出的,六拍逆变器的工作状况有两种基本型式: 120° 导电型和 180° 导电型。

180° 导电型指每一电力电子器件在一个周期内连续导通 180° ,具体地讲,每一相上下桥臂电力电子器件各导通 180° ,导通顺序是 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_5 、 V_6 ,每个器件相互间隔 60° ,两个器件之间的换相是在同一桥臂内进行。各相之间相位差为 120° ,每个 60° 区间有 3 个器件同时工作。输出相电压是梯形波,线电压是矩形波,如图 1-5a 所示。

120° 导电型指每一电力电子器件在一个周期内连续导通 120° ,具体地讲,每一相上下桥臂电力电子器件各导通 120° ,导通顺序是 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_5 、 V_6 ,每个器件相互间隔 60° ,两个器件之间的换相是在相邻桥臂内进行,各相之间相位差为 120° ,每个 60° 区间有两个器件同时工作,输出相电压是矩形波,线电压是梯形波,如图 1-5b 所示。

对于 180° 导电型,输出电压的开关状态有 6 个,每一开关状态有 3 个器件导通,导通区间为 60° ,这期间,其中有两个器件并联后接 U_d (或 0),另一个开关器件则单独接 0 (或

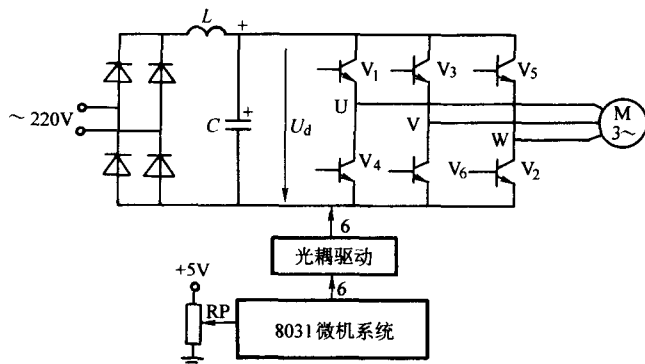


图 1-4 等脉宽 PWM 控制变频器系统框图

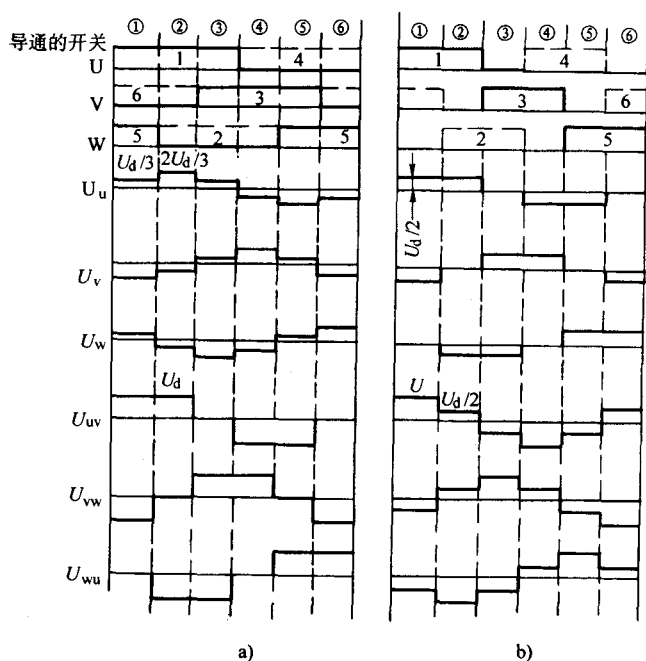


图 1-5 三相逆变器的工况

a) 180° 导电型 b) 120° 导电型

U_d)。通过某种方式让单独接 0 (或 U_d) 的那个器件所在的那一相的上、下桥臂两个开关器件, 在此 60° 区间交替地导通和关断若干次, 然后再进入下一个 60° 区间。这样, 六拍之后即形成一个周期。设在某一个 60° 区间是 V_2 、 V_6 并联后接 0, V_1 单独接 U_d 。现在让 V_2 、 V_6 保持不变, 而让 V_1 所在 U 相的上、下桥臂的两个开关器件 V_1 与 V_4 , 在此 60° 区间交替导通和关断 8 次, 当 V_1 通 V_4 断时输出电压, 反之不输出电压, 反复之后就形成图 1-6 所示的第一个 60° 区间的波形, 即为等脉宽 PWM 信号。

SPWM 控制是为了克服等脉宽 PWM 控制的输出电压中含有较大谐波分量而发展来的。它是以一个正弦波作为基准波 (称为调制波), 用一系列等幅的三角波 (称为载波) 与基准正弦波相交, 由它们的交点确定逆变器开关模式, 当基准正弦波高于三角波时, 使相应的开关器件导通; 当基准正弦波低于三角波时, 使开关器件截止。由此使逆变器的输出电压为一等幅、不等宽且脉冲面积与该区间正弦波下面积成比例, 故称作正弦波脉宽调制 (SPWM), 如图 1-7 所示。由理论可知, 这样电压脉冲序列可使负载电流中谐波成分大为减少, 提高载波 (三角波) 的频率可使负载电流波形趋近于正弦波。

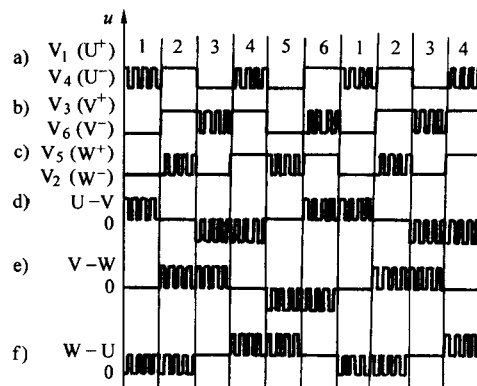


图 1-6 等脉宽 PWM 变频器驱动信号和输出电压波形

a)~c)各晶体管驱动信号 d)~f)逆变器输出线电压波形

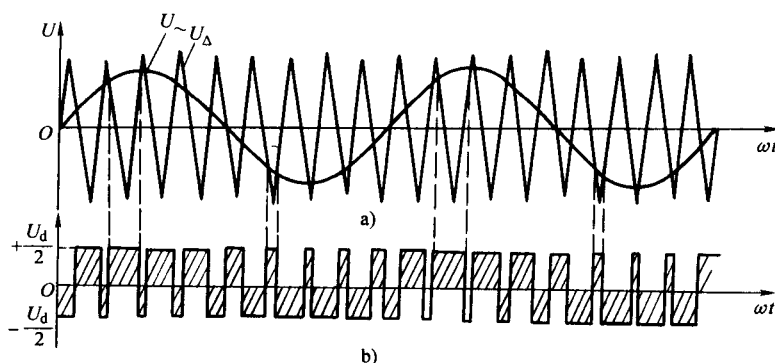


图 1-7 SPWM 控制波形

a) 正弦波与三角波 b) 逆变器输出电压波

磁链跟踪型 PWM 控制是从电动机的角度出发的, 它以三相对称正弦波电压供电时, 三相对称电动机定子的理想的磁链圆为基准, 由三相逆变器不同开关模式所形成的实际磁链矢量来跟踪基准磁链圆。在跟踪过程中, 对逆变器的开关模式作适当切换, 从而形成 PWM 波。

电流跟踪控制是基于反馈控制的思想, 它是将一个正弦波电流给定信号与变频器输出电流的实测信号相比较, 若实际电流值大于给定值, 则通过变频器开关器件动作使之减少, 反之, 则使之增加。从而使实际输出电流围绕着给定正弦波电流作锯齿形变化, 即输出电流跟踪给定电流。与此同时, 逆变器输出的电压波成为 PWM 波。总之, 电流跟踪控制变频器实际上是一个通常电压型 PWM 变频器加一个电流闭环构成的继电控制系统。

(二) 控制电路

现代通用变频器控制电路大多以单片机为核心的数字控制技术, 控制电路主要功能: 接受各种设定信息和指令, 并依据这些指令和设定信息形成驱动逆变器工作的 PWM 信号, 控制变频器主电路功率器件的通断, 实现变频器电压和频率可调及故障诊断保护, 控制电路如图 1-3 所示。主要组成部分有信号设定 (频率给定 f_1^* 、给定积分器)、正弦参考信号幅值和频率控制电路 (绝对值运算器、压控振荡器、函数发生器、极性鉴别器)、PWM 波发生器 (三相正弦波发生器、锁相环、三角波载波发生器、比较器) 及与主电路相隔离的电压/电流检测回路、驱动回路及保护回路。

通用型变频器实现变频变压控制 (VVVF 控制), 即恒 U/f 控制, 正是在改变频率的同时控制变频器输出电压, 使电动机磁通保持一定 (如果磁通太弱, 使电动机铁心不能充分利用, 反之, 磁通过强, 又会使铁心饱和。同时, 过大励磁电流使绕组过热而损坏电动机)。在较宽的调速范围内, 电动机的转矩、效率、功率不下降。

由电动机理论知

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{N1} \Phi_m \quad (1-3)$$

式中 E_1 ——气隙磁通在定子中每相电动势有效值 (V);

N_1 ——定子绕组每相串联匝数;

k_{N1} ——基波绕组系数;

Φ_m ——每极气隙磁通量 (Wb);

U_1 ——定子相电压有效值 (V)。

可见, 在保持 U_1/f_1 为常数时, 即可改变电动机电压和频率 (或转矩和转速)。图 1-3 中给定积分器的功能是将阶跃信号转变为斜坡信号, 可以消除阶跃给定信号给系统带来的不利影响, 利用工作特性限定输出频率的升降速率。当给定积分器输出为正时, 通过极性鉴别器控制三相正弦波的相序, 再控制逆变器三相电压的输出相序, 使电动机正转; 反之, 电动机反转。函数发生器用来实现低频电压补偿, 以使在整个调频范围内 U/f 恒定。给定积分器输出信号的大小可控制电动机转速的高低, 它经过绝对值运算器后, 一路经过压控振荡器控制正弦参考信号的频率, 另一路经过函数发生器控制参考正弦信号的幅值, 并保证正弦信号的幅频成比例地变化, 然后去控制 PWM 波的脉宽和频率, 进而控制逆变器输出调制波的脉宽和频率, 使施加在异步电动机定子 U/f 成比例地变化, 从而控制电动机转速的高低。控制电路中的锁相环是为了保证载波与参考波的频率关系, 同时为了减少逆变器输出电压中的谐波分量。

控制电路中核心部件是三相正弦波发生器, 可由模拟电路或数字电路产生, 但模拟电路线路复杂, 调整困难。这里介绍采用数据存储查表输出方式, 构成原理如图 1-8 所示。在压控振荡器输出脉冲频率和函数发生器输出电压作用下, 输出为三相模拟正弦波, 在只读存储器 (ROM) 中固化三相互差 120° 相角量化后的正弦数据。例如, 把每相一周期的正弦量量化为 256 个量化值, 并分别按顺序存储于 256 个单元。而三相正弦量化值的起始地址不同, 并且存储的起始正弦量化值应相差 120° 。当有输入信号 f_i 时, 可逆计数器开始计数, 计数结果作为 ROM 查表的地址码, 三个地址区的选通由高频节拍发生器控制, 分时把三相正弦波输出给各自数模转换器 (DAC), 使得得到三相模拟正弦波, 其频率 $f_1 = 1/256 f_i$ 。这样,

当改变频率给定值，可以按一定规律改变三相波的幅值和频率，从而改变逆变器输出电压大小和频率，控制异步电动机的转速。

图 1-9 为电流脉宽调制的闭环变频调速系统原理图。主电路由整流二极管、直流滤波电容和电力晶体管组成逆变器。逆变桥输入为恒定不变的直流电压，通过控制电流的脉宽调制，直接控制异步电动机的定子电流，从而控制电磁转矩，达到改变转速的目的。控制电路由转速、电流双闭环电路组成，其中给定积分器的功能是将阶跃信号转变为

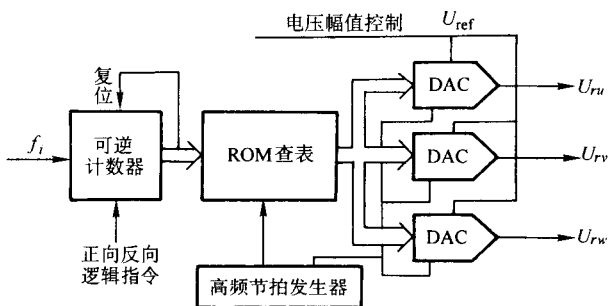


图 1-8 三相正弦波发生器原理图

斜坡信号，可以消除阶跃给定信号给系统带来的不利影响；函数发生器实现异步电动机的控制方式，从而使定子电流随转差频率的变化；转速调节器 ASR 的输出一路作为函数发生器的输入，另一路经压频变换器后输出脉冲信号，施加给三相正弦波发生器，用以控制正弦波信号的频率，而正弦波信号的幅值是通过乘法器与函数发生器的输出信号相乘而改变的，这样就得到三相幅值和频率都可改变的定子电流给定信号。转速调节器一般用 PI 调节器，电流控制器是带滞环的比较器。当实际电流与给定电流（来自此乘法器输出正弦波电流）比较后，出现一定的差值时，电流控制器的输出经过驱动器后就会使相应的电力晶体管导通或截止，迫使电流的偏差消失，实现对电流的跟踪控制，使电动机的转速快速达到给定速度。

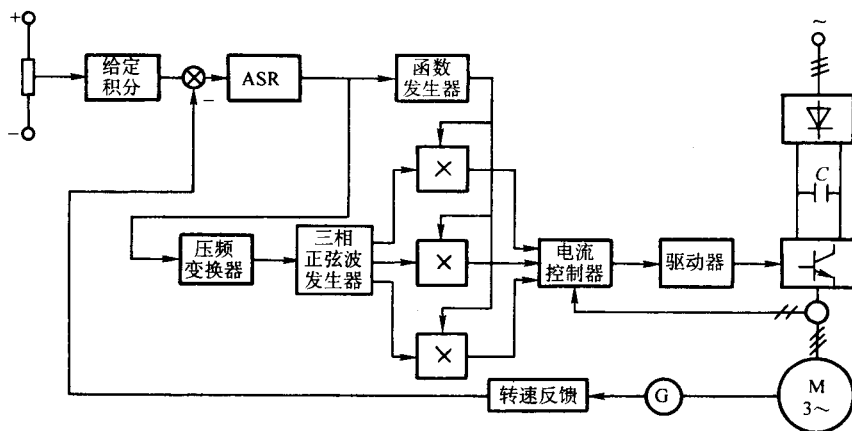


图 1-9 电流脉宽调制的变频调速系统原理框图

四、微机数字控制直流传动系统构成原理

微机数字控制电气传动系统指以单片机为核心所构成的测量和控制系统，与模拟控制系统相比，主要特点是离散化和数字化，即为了将控制量和反馈量输入计算机，必须首先在具有一定周期的采样时刻对它们进行实时采样，形成一连串的脉冲信号，这就是离散化。一般情况下，采样周期 $T_{\text{sam}} \leq T_{\text{min}} / (4 \sim 10)$ ， T_{min} 为控制对象的最小时间常数，或采样频率 $\omega_{\text{sam}} \geq (4 \sim 10)\omega_c$ ， ω_c 为控制系统的截止频率。由于采样后得到的离散值不能直接送入计算机，还须

经过数字化,即用一组数码(如二进制码)来逼近离散模拟信号的幅值,将它转换成数字信号,这就是数字化。数字量化的原则是在保证不溢出的前提下,精度越高越好,可用存储系数 K 来表示量化的精度,其定义为

$$K = \frac{\text{计算机内部存储值}}{\text{物理量的实际值}}$$

微机数字控制系统中的存储系数相当于模拟控制系统中的反馈系数。显然,存储系数与物理量的变化范围和计算机内部定点数的长度有关。例如某直流电动机额定电枢电流 I_N , 允许过电流倍数 $\lambda_m = 1.5$, 额定转速 n_N , 计算机内部定点数占一个字位置(16位),除去最高位须用作符号外,故只有15位可表示量值。因此,对于双闭环调速系统中电枢电流存储系数 K_β 为

$$K_\beta = \frac{2^{15} - 1}{1.8 I_N} \quad (1-4)$$

转速存储系数 K_α 为

$$K_\alpha = \frac{2^{15} - 1}{1.3 n_N} \quad (1-5)$$

微型计算机数字控制系统,按控制方式可分为:①D/A转换控制方法,使用D/A转换电路将数字信号转换为模拟信号,再经功率放大器放大为电动机的控制电压或电流,实现对电动机的控制。该方法因使用的是放大型电力晶体管,其电路为功耗型结构,一般只适用于小型、微型电动机的情况。②PWM控制方法,将数字信号转换为脉宽调制(PWM)信号,经开关放大器对电动机电压或电流进行调节,实现对电动机的控制。因开关型功率放大器功率损耗小,使得大部分中小功率电气传动系统都使用该方法。③晶闸管触发方法,将计算机运算的数字量转换为晶闸管的控制角度,实现对电动机的电压或电流的控制。该方法实现的系统因受到市电工频的影响,快速性较差,目前只应用于特大功率的电气传动系统。控制系统由硬件和软件两部分组成,微机数字控制双闭环直流PWM调速系统硬件结构如图1-10所示。如果采用晶闸管可控整流器,只是不用微机中的PWM变换器生成环节,而采用不同的方式控制晶闸管触发延迟角。应当指出,对于数字控制通用变频器——异步电动机调速系统,由于该系统多是转速或频率开环、恒压频比控制系统,应将图中转速闭环中检测环节和微机的数字测速程序删去。

1. 主电路

三相交流电源经不可控整流器变换为电压恒定的直流电源,再经过直流PWM变换器得到可调的直流电压,给直流电动机供电。

2. 检测回路

检测回路包括电压、电流、温度和转速检测,其中电压、电流和温度检测由A/D转换通道变为数字量送入微机,转速检测用数字测速。

3. 故障综合

对电压、电流、温度等信号进行分析比较,若发生故障立即通知微机,以便及时处理。

4. 数字控制器

数字控制器是系统的核心,选用专为电动机控制设计的系列单片微机(或其他),配以显示、键盘等外围电路,通过通信接口与上位机或其他外设交换数据。这种微机芯片本身带