

图书在版编目(CIP)数据

电机拖动与变频调速 / 汤海梅, 杨代强主编. —上海: 华东师范大学出版社, 2014. 2

十二五创新机电一体化系列教材

ISBN 978-7-5675-1740-0

I. ①电… II. ①汤… ②杨… III. ①电力传动—高等职业教育—教材②变频调速—高等职业教育—教材
IV. ①TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 024204 号

电机拖动与变频调速

总 主 编 吕景泉
主 编 汤海梅 杨代强
项目编辑 吴 余
装帧设计 创图文化

出版发行 华东师范大学出版社
社 址 上海市中山北路 3663 号 邮编 200062
网 址 www.ecnupress.com.cn
电 话 021-60821616 行政传真 021-62572105
客服电话 021-62865537 门市(邮购)电话 021-62869887
地 址 上海市中山北路 3663 号华东师范大学校内先锋路口
网 店 <http://hdsdcbs.tmall.com>

印 刷 者 成都市海翔印务有限公司
开 本 787×1092 16 开
印 张 19
字 数 438 千字
版 次 2014 年 8 月第 1 版
印 次 2014 年 8 月第 1 次
书 号 ISBN 978-7-5675-1740-0/TB·079
定 价 46.00 元

出 版 人 王 焰

(如发现本版图书有印订质量问题,请寄回本社客服中心调换或电话 021-62865537 联系)

目 录



第一篇 理论篇

第一章 概 述	1
第一节 电机及电力拖动系统概述	1
第二节 变频调速技术概述	3
第三节 电力电子技术概述	5
第二章 直流电动机及电力拖动	16
第一节 直流电动机的基本结构和工作原理	16
第二节 电力拖动系统的运动方程式和负载的机械特性	32
第三节 直流电动机的机械特性	35
第四节 他励直流电动机的起动、调速和制动	41
第三章 三相交流电动机及电力拖动	51
第一节 三相异步电动机的基本结构和工作原理	51
第二节 三相异步电动机的定子电路和转子电路	60
第三节 三相异步电动机的机械特性	70
第四节 三相异步电动机的起动、调速和制动	75
第五节 同步电动机	85
第四章 驱动和控制电机	90
第一节 单相异步电动机	90
第二节 步进电动机	94
第三节 伺服电动机	102
第五章 变频器的工作原理及电路结构	113
第一节 变频调速的基本控制原理及其机械特性	113
第二节 变频器的基本构成	117



第三节 变频器的控制方式	134
第四节 高压变频器	143
第六章 变频器的选用、安装和维护	150
第一节 变频器的选用	150
第二节 变频器的安装和维护	154

第二篇 实践篇

第七章 变频器的应用	164
项目一 西门子 6SE70 变频器	164
任务一 西门子 6SE70 变频器的单机调试	164
任务二 西门子 6SE70 变频器与 S7-300 PLC 的联机运行	186
任务三 西门子 6SE70 变频器的 PROFIBUS 通信	190
项目二 西门子 S120 变频器	216
任务一 西门子 S120 变频器的单机调试	216
任务二 用 S7-300/400 通过 DP 网络控制西门子 S120 变频器	234
任务三 用触摸屏通过 DP 网络直接控制西门子 S120 变频器	241
项目三 西门子 MM440 变频器	246
任务一 西门子 MM440 变频器的基本控制	246
任务二 西门子 MM440 变频器、S7-200 PLC 和触摸屏的综合实训	259
项目四 汇川变频器	267
任务一 汇川变频器的基本控制	267
任务二 汇川变频器与三菱 PLC 的联机运行	278
任务三 汇川变频器 MODBUS 通讯网络	285
参考文献	292

第一篇 理论篇

第一章 概述



章前导语

电力拖动是指以电动机为原动机驱动生产机械的系统的总称,目的是将电能转变为机械能,实现生产机械的起停以及调速,完成各种生产工艺过程的要求,保证生产过程的正常运行。

在现代工业中,为了实现生产过程自动化的要求,电力拖动不仅包括拖动生产机械的电动机,而且包括控制电动机的一整套控制系统,有直流调速系统和交流调速系统。由于直流电动机本身结构上存在机械式换向器和电刷这一致命弱点,这给直流调速系统的开发和应用带来了一系列限制。交流调速技术已经从最初的只能用于风机、泵类的调速过渡到针对各类高精度、快响应的高性能指标的调速控制。随着电力电子变频技术、数字控制技术的发展和高性能交流电动机调速方法的使用,现在,已经基本上实现了以交流调速取代直流调速。在众多的交流调速方法中,变频调速是唯一能在调速性能及效率上与直流调速竞争,实现高性能调速的方法。因此,变频调速已逐渐成为电气传动中的主流。随着生产工艺日益复杂,以及现代工业对自动化设备生产效率要求的日益提高,高品质、高性能的伺服驱动控制器的应用也越来越广泛。

本章主要对电机及电力拖动系统,变频调速技术和电力电子技术进行简要介绍。

第一节 电机及电力拖动系统概述

学习目标

1. 了解电机的概况;
2. 了解电力拖动系统的概况。



一、电机概述

电机是实现能量转换和信号转换的电磁装置。用作能量转换的电机称为动力电机,用作信号转换的电机称为控制电机。

动力电机按电流种类的不同,又分为交流电机和直流电机两大类。将机械能转换成电能的称为发电机;将电能转换成机械能的称为电动机。任何电机,理论上既可作发电机运行,也可作电动机运行,所以电机是一种双向的机电能量变换装置,这一特性称为电机的可逆原理。

在用电系统中,电动机作为主要的动力设备而广泛地应用与工农业生产、国防、科技及社会生活等各个方面。电动机负荷约占发电量的 60%~70%,成为用电量最多的电气设备。

其中交流电动机拥有量最多,根据统计,交流电动机用电量占电机总用电量的 85%左右。交流电动机的诞生和发展已有一百多年的历史,至今已经研究、制造了形式多样、用途各异的各种容量、各种品种的交流电动机。交流电动机分为同步电动机和异步(感应)电动机两大类。每种又有单相和三相之分。电动机的转子转速与定子电流的频率保持严格不变的关系,即是同步电动机;反之,若不保持这种关系,即是异步电动机。直流电动机按励磁方式的不同有他励电动机、并励电动机、串励电动机和复励电动机四种。

控制电机是在普通旋转电机的基础上发展起来的小功率电机,主要用来完成控制信号的变换与传递,在各种自动化控制系统中常用作检测、放大、执行和校正等元件使用,要求它们技术性能稳定可靠、动作灵敏、精度高、体积小、重量轻、耗电少。在国防工业、数控机床、计算机外围设备、机器人和音像设备等均大量使用控制电机。

二、电力拖动系统概述

电力拖动系统是指用电动机作原动机来拖动生产机械运行的系统,如图 1-1 所示,包括一个电子控制装置(驱动装置),一台电动机和负载。它们的任务是将电源供给的电能转换成机械能。为了使工艺过程最优化,驱动装置应该能够实现调速运行。按照电动机的种类不同,电力拖动系统又分为直流调速系统、交流调速系统和伺服调速系统。

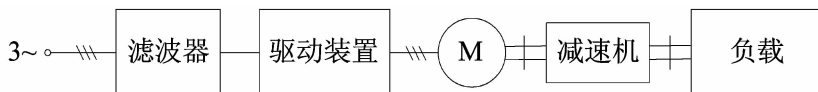


图 1-1 电力拖动系统

众所周知,直流电动机的调速特性十分优异,可以通过调节电压或调节励磁来调节速度,而且是平滑连续无级调速。采用转速、电流双闭环直流调速系统可获得优良的静、动态调速特性。因此,长期以来(20 世纪 80 年代以前)在变速传动领域中,直流调速一直占据主



导地位。但是由于直流电动机本身结构上存在不可克服的缺点:结构复杂,造价较高;换向器和电刷的机械磨损仍需耗费相当的维修费用;另外,某些特殊的应用也会对直流电机中的换向器的寿命造成影响,例如,在腐蚀性气体中工作,或者遇到一些强共振,超高速运转以及堵转负荷等问题。所以使得直流调速系统的应用也相应受到了限制。与此相反,交流电动机,特别是鼠笼异步电动机的优势就体现出来了。转子结构采用简单的鼠笼式设计,这种结构适于各种环境下的运行,并且具有制造容易、价格便宜、坚固耐用、转动惯量小、运行可靠、很少维修等优点。但是长期以来由于受科技发展的限制,把交流电动机作为调速电机的困难问题未能得到较好的解决,在 20 世纪 60 年代以后,随着电力电子技术的发展,半导体变流技术的交流调速系统得以实现。尤其是 20 世纪 70 年代后期,仅交流变频调速在调速传动领域中已占了相当大的比重。随着电力电子技术的发展和应用,现代控制理论的诞生和发展,及微型计算机和大规模集成电路的迅速发展和广泛应用,交流调速技术得到了显著发展。在众多的交流调速方法中,变频调速是唯一能在调速性能及效率上与直流调速竞争,实现高性能调速的方法。20 世纪 90 年代以来,变频调速技术在工业生产的各个领域广泛应用,覆盖了电气传动调速控制的各个方面。电压等级从 110V~10000V;容量从数百瓦的伺服系统到数万千瓦的特大功率传动系统;从一般要求的调速传动到高精度、快响应的高性能的调速传动;从单机调速传动到多机协调调速传动,几乎无所不有。现在,交流调速系统已全面、逐步取代直流调速系统。

随着生产工艺过程愈来愈趋向复杂化,同时要求自动化生产效率越高越好,高质量和高动态响应的伺服驱动控制器越来越必要。伺服驱动器主要用于机床、精密机械、物流设备和工业机器人的定位控制。现在,一些要求精确定位或多轴同步运转的系统,如印刷,输送装置和切割机中也越来越多地开始使用伺服驱动器。这种先进的驱动器将对降低成本,提高效率产生深远影响。

第二节 变频调速技术概述

学习目标

1. 了解变频调速技术的概况;
2. 了解变频调速技术的发展趋势。

一、变频调速技术的概况

变频技术的发展,可以从以下四个方面进行综述。

(一)电力电子器件的发展

电力电子器件是现代交流调速装置的支柱,其发展程度直接决定和影响了交流调速技



术的发展。20 世纪 80 年代中期以前,变频装置功率回路主要采用晶闸管元件,它是半控器件,需换相回路,所以该装置的效率、可靠性、成本和体积均无法与同容量的直流调速装置相比。80 年代中期以后,被全控型器件所取代。全控型器件有大功率晶体管 BJT(Bipolar Junction Transistor)、门极关断晶闸管 GTO(Gate Turn Off thyristor)、大功率 MOS 场效应晶体管(MOSFET)和绝缘栅双极型晶体管 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)等,可以自行关断,提高功效,可以使制造的变频装置在性能与价格比上与直流调速装置相媲美,使变频器各种性能得到不断提高和完善。近年来 IGBT 已经模块化、智能化,制成了智能模块 IPM,不仅把功率开关器件和驱动电路集成在一起,而且还内藏有过电压、过电流和过热等故障检测电路,并可将检测信号送到 CPU,大大保证变频器的可靠性,并且缩小了变频器的体积。

(二)脉宽调制(PWM)技术

脉宽调制(PWM)技术的发展和应用优化了变频器的性能,目前几乎所有的变频器都采用这一技术。可以改善变频器的输出波形,使交流电动机定子得到了接近正弦波形的电压和电流,提高了电机的功率因数和输出效率。现代 PWM 生成电路大多采用具有高速输出口 HSO 的单片机(如 80196)及数字信号处理器 DSP(Digital Signal Processor),通过软件编程生成 PWM。近年来,新型全数字化专用 PWM 生成芯片 HEF4752、SLE4520 和 MA818 等都达到实用化,并已实际应用。

(三)控制技术的发展

第一代变频器采用的是压频比标量控制方式,它根据异步电动机等效电路确定的线性 U/f 比进行变频调速。电压是指基波的有效值,改变 U/f 只能调节电动机的稳态磁通和转矩,不能动态控制。为提高低频时电动机产生的转矩,第一代变频器通常采用提升电压以及随负载变化补偿定子绕组电压降的办法,拓宽变频调速范围 20:1 左右。

第二代变频器的主要特征是采用矢量控制(Vector Control,缩写为 VC)方式,它模拟直流电动机的控制方式,将异步电动机的定子电流空间矢量分解为励磁分量和转矩分量,使交流调速系统的动态性能得到了显著的提高。因为首先要控制励磁,所以又把矢量控制称为磁场定向控制。实践证明,采用矢量控制的交流调速系统的优越性高于直流调速系统。近年来采用直接转矩控制技术可获得更大的瞬时转矩和极快的动态响应,是一种很有前途的控制技术。

(四)计算机的应用

20 世纪 90 年代以后,计算机进入了变频器的结构和运行领域,提供多种功能:(1)取代一部分模块的功能,如 SPWM 波形的生成,矢量控制的实时计算等;(2)实现各种保护并且智能化,如自监控、自诊断;(3)进行运行控制,如起动和停止、加减速、正反转、制动等。总之,计算机配合模块及其他电气设备,进行协调、控制、通信、执行变频调速系统各项功能,成为系统的神经枢纽,目前正向网络化发展。



微机控制技术及大规模集成电路的应用提高了交流调速系统的可靠性和操作设置的多样性和灵活性,降低并减小了变频调速装置的成本和体积。

二、变频调速的发展趋势

(一)主电路逐步向集成化、高频化和高效率发展

(1)集成化主要是把功率元件、保护元件、驱动元件和检测元件进行大规模的集成,变为一个 IPM 的智能电力模块,使其具有体积小、可靠性高和价格低的优点。

(2)实现高频化主要是通过开发高性能的 IGBT 产品,提高其开关频率。

(3)实现高效率主要是通过降低电力电子器件的开关损耗。具体方法是开发研制新型变频器主电路,使电力电子器件在零电压或零电流下实现转换,即工作在“软开关”状态下,从而使开关损耗降低到零。软开关技术也可抑制电磁干扰。国内外都在积极研究与开发具有软开关功能的谐振变频器。

(二)PWM 整流电路

整流电路常采用不控二极管整流,它虽然控制简单,成本较低,但输入电流波形容易严重畸变,会影响电网的功率因数,造成谐波损耗大,使得电动机制动时的再生能量无法回馈给电网。现在已经开发出一种采用 PWM 整流电路,其电路结构与逆变器完全相同。其特点是:直流输出电压连续可调,输入电流波形基本为正弦,功率因数可保持为 1,并且能量可以双向流动。采用 PWM 整流电路的变频器又称为“双 PWM 变频器”,它输入输出的谐波很小,是对电网无污染的产品。

(三)高压大容量变频器的发展

随着高压全控型功率器件的发展,高压大容量变频器的应用趋势迅速加快了。目前应用较多的是采用 IGBT、IGCT 和 SGCT 的三电平高压变频器及级联式多电平高压变频器。当今多电平高压变频器已成为交流调速研究的新领域。

第三节 电力电子技术概述

学习目标

1. 了解变频器的功能及基本原理;
2. 了解功率半导体器件的分类及特点;
3. 了解半导体器件的发展。

一、功率变换和控制的作用

电力电子技术是应用在电力变换领域的电子技术。为什么要对电力(电能)进行变换?



仅从电力拖动角度分析,这是由于拖动系统运转所需的电能大多由固定频率(50Hz)的交流电网提供,但是,不同类型的拖动系统所需要的电源种类却并不相同。例如:三相交流调速系统需要电压、频率可调的三相交流电源,如图 1-2 所示。直流调速系统需要直流电压可调的直流电源,如图 1-3 所示。这样就需要一个功率变换和控制装置即变换器,它的任务就是将电源中的电压、电流、频率(包括直流)、相位、相数一项以上加以改变,以适合调速系统的需要。变换器也称变流器。电力电子技术是使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。

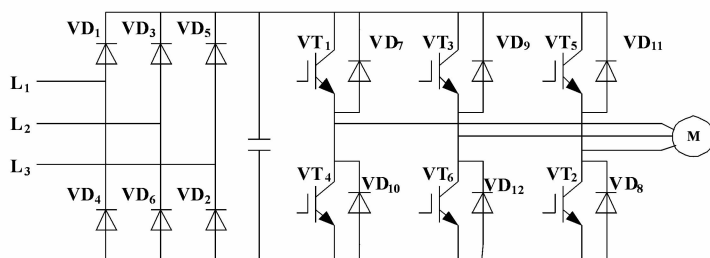


图 1-2 交—直—交变换器(变频器)控制的交流调速系统

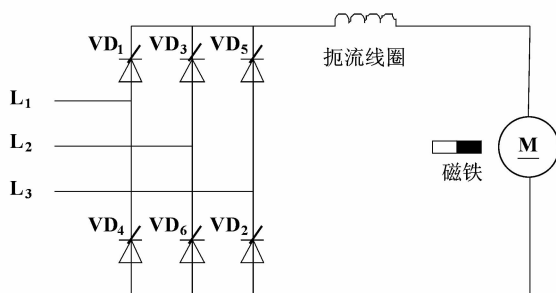


图 1-3 交—直变换器控制的直流调速系统

电能变换的四大种类:

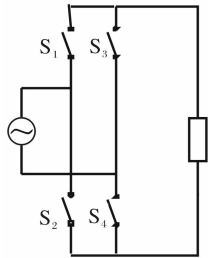
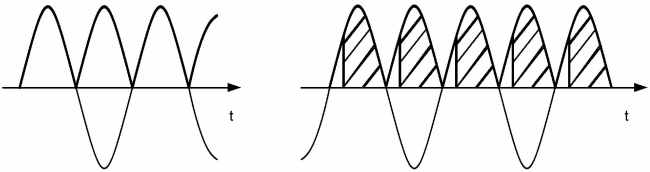
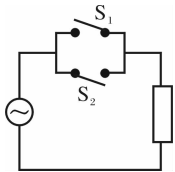
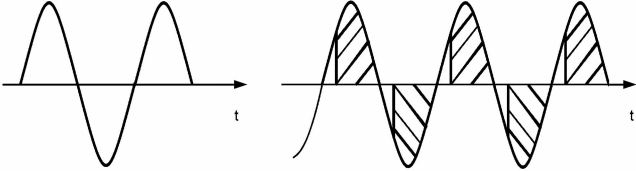
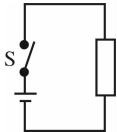
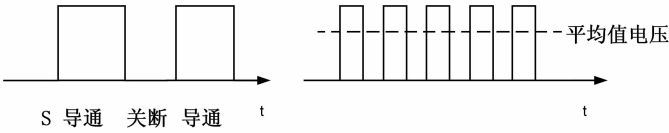
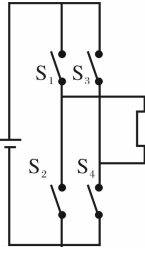
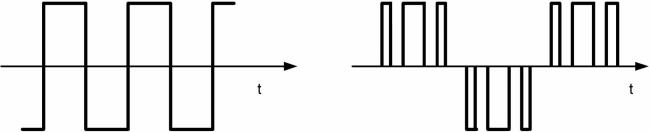
- (1) 整流,将输入的单相/三相交流电转换成直流电,电能由交流侧流向直流侧。
- (2) 逆变,将直流电转换成单相/三相的交流电,能量由直流侧流入交流侧。
- (3) 交流变流,将电压、频率和相数给定的交流电能转换成具有不同电压、频率和相数(通常 3 相)的交流电,例如变频器。若频率不改变,只改变电压大小,称为交流调压。
- (4) 斩波,将直流电转换成大小可调的直流电。

二、功率变换和控制的基本原理

在表 1-1 中,通过不同的电路结构和对开关通断的控制,实现功率变换和控制。电力电子技术是将该表中的开关置换成电力半导体开关。



表 1-1 功率变换和控制的基本电路

方式	电路结构	输出(负载)电压波形
1		 说明:利用 $S_1 \sim S_4$ 的导通和关断组合,将交流变成直流。同时控制开关导通的时间,控制直流电压的大小。(AC/DC)
2		 说明:利用 S_1, S_2 的导通和关断,并控制通断时间,就可控制交流电压的大小。(AC/AC)
3		 说明:利用 S 的导通与关断,可控制负载的直流电压。(DC/DC)
4		 说明:利用 $S_1 \sim S_4$ 的导通和关断组合,及导通关断时间的控制,可将负载的电压值控制在正负值范围。还可以控制负载的交流频率。(DC/AC)

三、功率变换用的开关所要求的条件

在拖动控制装置的电能转换过程中,为了最大程度地降低能耗,功率变换器中的开关元件应符合下列要求:

(1)开关处于关断状态时能承受任何电压,并且泄漏电流为零;



- (2)开关处于导通状态时能流过大电流,开关上不存在压降;
- (3)可通过相应的指令(小信号)控制开关的通/断;
- (4)开关件无磨损;
- (5)允许频繁通/断也不老化。

当以上条件满足时,那么开关的损耗为零,可实现理想开关。但是,完全满足上述条件的开关是不存在的。实践证明,半导体开关基本能够满足上述要求。但是,与理想开关相比,半导体开关仍会造成一定程度的能量损耗。主要原因是:

- (1)稳定的导通状态下,存在导通压降;
- (2)稳定的关断状态下,存在泄漏电流;
- (3)开关切换时,由于电流和电压同时存在,例如从稳定的“断开”状态切换成“导通”状态,反之亦然。

因此,半导体开关在实际应用中会受到几方面的限制:承受的电压;通态的电流;开关频率;运行温度。

四、功率半导体开关的种类

在不同设计类型的变流器中,会采用不同的半导体开关。实际上可作为半导体开关使用的功率半导体器件有许多种,表 1-2 给出了常用的功率半导体器件种类。

表 1-2 常用功率半导体器件

器件种类	器件名称	器件符号
不可控器件	二极管	A 阳极 K 阴极
导通可控器件 (半控器件)	晶闸管 SCR	A 阳极 G 门极 K 阴极



表 1-2(续表)

器件种类	器件名称	器件符号
导通及关断均可控器件 (全控器件)	可关断晶闸管 GTO	
	双极型晶体管 GTR	
	功率场效应晶体管 P-MOSFET	
	绝缘栅双极型晶体管 IGBT	

下面,我们就表 1-2 所列的半导体开关类型加以介绍。

(一)二极管

二极管是最简单的半导体开关,二极管有两极:阳极(A)和阴极(K),见表 1-2。在阳极和阴极间加一个正向电压时,二极管导通。并产生由负载决定的电流,如果改变电压 U_{AK} 的方向,二极管就截止(反向偏置)且无电流。由二极管组成的整流器属于不可控整流器,结构如图 1-4 所示,其作用是将交流输入电压转换成直流电压,在这种整流回路中,直流输出电压与输入电压之间存在固定的比例关系:

$$\text{单相桥式整流电路} \quad U_d = 0.9U_2$$

$$\text{三相桥式整流电路} \quad U_d = 2.34U_2$$

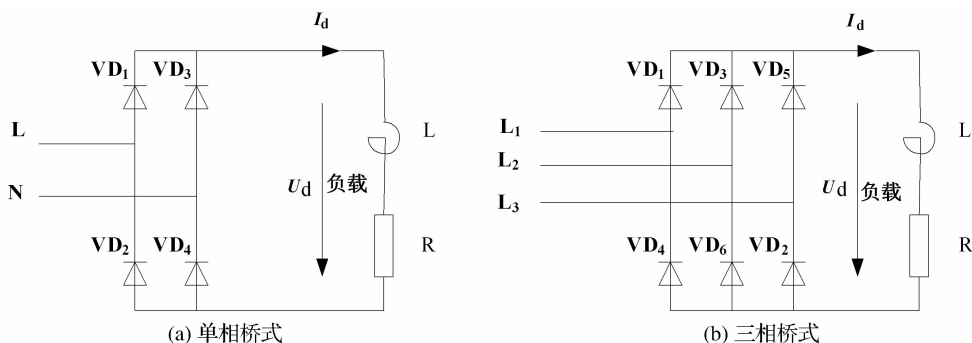


图 1-4 二极管整流电路

(二)晶闸管

晶闸管(Thyristor)是晶体闸流管的简称,又称作可控硅整流器(Silicon Controlled Rectifier—SCR),以前被简称为可控硅。自从 20 世纪 50 年代问世以来已经发展成了一个大的家族,它的主要成员有单向晶闸管、双向晶闸管、光控晶闸管、逆导晶闸管、可关断晶闸管、快速晶闸管等等。下面介绍的是单向晶闸管,就是常说的普通晶闸管,如图 1-5 所示,它是由四层半导体材料组成的,有三个 PN 结,对外有三个电极:第一层 P 型半导体引出的电极叫阳极 A,第三层 P 型半导体引出的电极叫控制极 G,第四层 N 型半导体引出的电极叫阴极 K。从晶闸管的电路符号可以看到,它和二极管一样是一种单方向导电的器件,晶闸管内的电流只能沿着从阳极到阴极的方向流动,关键是多了一个控制极(门极)G,这就使它具有与二极管完全不同的工作特性。

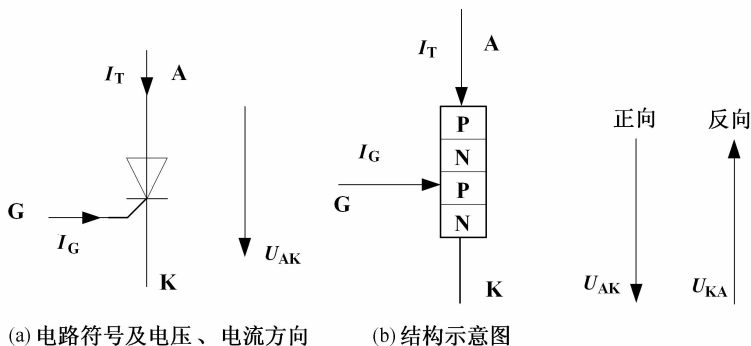


图 1-5 半导体开关:晶闸管原理的符号、结构、电流和电压方向

晶闸管与二极管的不同之处在于:在二极管上施加正向电压 U_{AK} 后,会马上导通,而晶闸管在施加正向电压后还需要在其控制极 G 施加一个控制脉冲(触发脉冲),才能导通。

在由晶闸管组成的整流器中,通过控制晶闸管触发脉冲出现的时刻来改变直流侧输出电压的大小,我们把“触发脉冲出现的时刻”用控制角 α 来表示,并把这种控制方式称为相控方式。但采用二极管时,就不能对电压大小进行控制。因此,我们认为这种电路属于“可控”整流电路。另一方面,晶闸管一旦导通控制极就失去了控制作用,只有当流过管子的电流低



于某值或承受反向电压,才能使其关断,所以晶闸管为半控器件。

晶闸管导通后不能立即截止。电流为零后至少需要几百微秒的恢复时间,晶闸管才能重新恢复正向阻断状态,所以晶闸管的开关频率较低。但由于其能承受的电压和电流容量仍然是目前电力电子器件中最高的,而且工作可靠,因此在大容量的应用场合仍然具有比较重要的地位。

晶闸管主要参数:

- (1)电压定额 U_{TN} ;
- (2)通态(峰值)电压 U_T ;
- (3)通态平均电流 $I_{T(AV)}$;
- (4)维持电流 I_H ;
- (5)擎住电流 I_L ;
- (6)浪涌电流 I_{TSM} ;
- (7)开通时间 t_{on} 与关断时间 t_{off} (工频电路可不考虑开关时间);
- (8)断态电压临界上升率 du/dt 及通态电流临界上升率 di/dt ;
- (9)额定结温 T_{jm} 。

(三)晶体管

晶体管有三种结构,如表 1-2 所示:

- (1)双极型晶体管(GTR);
- (2)功率场效应晶体管(P-MOSFET);
- (3)绝缘栅双极型晶体管(IGBT)。

下面主要介绍绝缘栅双极型晶体管(IGBT)。

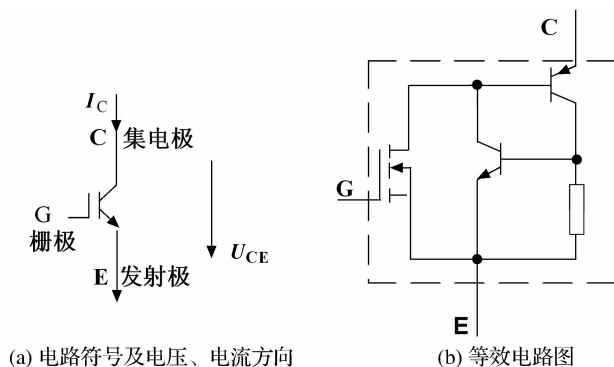


图 1-6 IGBT 半导体开关简图

同晶闸管一样,关断状态时晶体管承受高电压,不一样的是控制端(基极)不仅可以控制器件的导通,还可以控制器件的关断,属于全控器件,也叫自关断器件。而二极管和一般的晶闸管只能在电流/电压波形图再过零点时才能断开。在导通阶段,晶体管的基极应一直供给信号。



双极型晶体管存在的主要缺陷在于需要较高的基极控制电流,场效应晶体管存在的主要缺陷是较高的导通压降。

绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor—IGBT),是由 GTR 和 MOS-FET 复合而成的,是电压驱动型功率半导体器件,它综合了双极型晶体管的低导通压降和 MOSFET 驱动功率低的优点。因此,IGBT 已经非常接近理想状态的开关,其电路图如图 1-6 所示。

绝缘栅双极型晶体管主要参数:

- (1)集电极—发射极击穿电压 U_{CES} ;
- (2)最大集电极电流 I_C ;
- (3)最大集电极功耗 P_{CM} ;
- (4)集—射极饱和电压 $U_{CE(sat)}$;
- (5)开启电压 U_T 。

五、功率半导体开关的比较

功率半导体器件除了表 1-1 中列出的之外,还有静电感应晶闸管(SITH 晶闸管)及场控晶闸管(MCT 晶闸管)等,其种类非常多,但没有一种是十全十美的的器件。下面对各个器件的主要特点进行介绍以便进行比较。

晶闸管 SCR 承受电压和电流容量在所有器件中最高。由于是半控器件,在直流电路内不能自关断,所以用晶闸管组成变频器就变得很复杂,而且逆变后的电压、电流波形也不理想,直接影响了电动机的性能。因此,晶闸管变频器没有得到推广和普及。

可关断晶闸管 GTO 与晶闸管结构相同,但属于全控器件,可以通过门极信号进行开通和关断。控制容量也很大。随着额定电压的升高,通态压降的增加比较小,但其开关损耗会随着频率的增加而加大。通常,全控器件大多数在高开关频率下工作,GTO 是属于全控型器件中工作频率范围最低的器件。关断时门极负脉冲电流大,驱动功率大,驱动电路复杂。GTO 主要用于低频大功率场合。

双极型功率晶体管 GTR 耐压高,通流能力强,饱和压降低;缺点:开关速度低,为电流驱动,所需驱动功率大,驱动电路复杂,存在二次击穿问题。开关频率增大时的损耗比 GTO 要小,但比 MOS 系列器件要大,因此,它主要用于中容量及中等程度频率范围。

功率 MOSFET 是单极型晶体管,开关速度快,输入阻抗高,热稳定性好,驱动功率低,驱动电路简单,不存在二次击穿问题。在低频情况下,与双极型晶体管相比,损耗相当大,另外,电流容量小,耐压低,所以常用于小容量高频率场合。

综上所述,通常容量大的器件,开关速度慢,反之,速度快的器件,容量却不够大。

IGBT 是 GTR 和 MOSET 的复合结构,以兼有两者长处为目标而开发的器件,具有开关速度快、开关损耗小、耐脉冲电流冲击的能力,通态压降较低,输入阻抗高,为电压驱动,驱



动功率小。相比,频率比双极型晶体管高、容量比功率 MOSFET 大。由于 IGBT 的优良性能,事实上已取代了 GTR,现在成为中、小功率逆变器、变频器等电力电子装置的主流器件。缺点:开关速度低于电力 MOSFET,电压、电流容量不及 GTO。

六、器件的驱动电路

器件的驱动电路接收控制系统输出的弱电平信号,经过处理后给器件的控制极提供足够大的电压或电流,使之立即导通及关断。采用性能良好的驱动电路,可以使电力电子器件工作在较理想的开关状态,缩短开关时间,减少开关损耗,对装置的运行效率、可靠性和安全性都有重要意义。另外,通过驱动电路还可以实现控制电路与主电路之间的电气隔离、抗干扰等。驱动电路在电力变换电路中的位置示意图如图 1-7 所示。

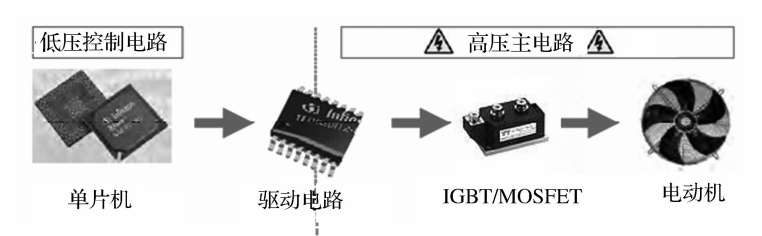


图 1-7 驱动电路的位置

七、器件的保护

对晶闸管的保护主要有过电压保护和过电流保护,对过电压常采用的方式是并联电容,如图 1-8 所示。电容可以使电压不能突变,电阻可以消耗能量,并能抑制电路振荡。过电流可在电路中用快速熔断器、过电流继电器等保护。

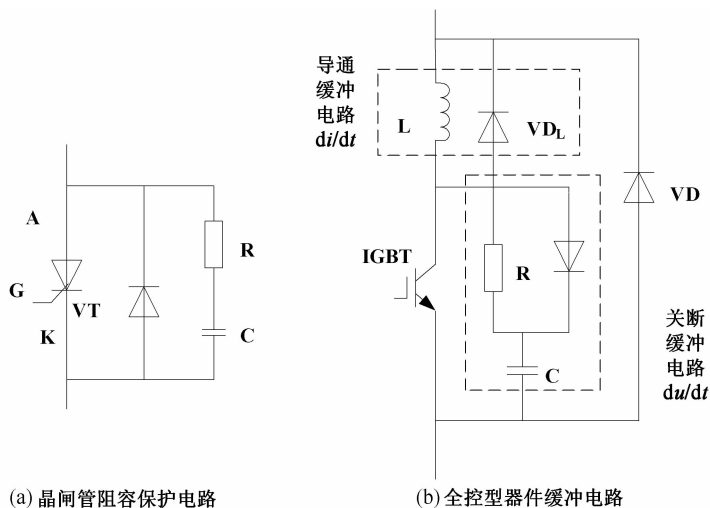


图 1-8 器件的保护



对全控型器件要设置缓冲电路,改变器件开与关过程中的电压电流轨迹,以达到减小开关损耗的目的。

由于篇幅的限制,电力电子器件在其他方面保护就不在此赘述,请参考有关书籍。

八、器件发展

任何器件的发展,总是决定于两个因数,一是应用的需要,一是器件本身在理论上和工艺上的突破。电力电子器件的发展也是这样,它大致有如下几个方面:

(一)现有器件扩大容量提高性能

例如 GTO,采用大直径均匀技术和全压接式结构,通过电子寿命控制,兼顾通态电压和关断损耗二者之间矛盾,可望开发出 12kV/10kA 的器件。例如 IGBT,探索内部功率引线尽量由超声压焊或改压接式结构,以进一步提高工作可靠性。

(二)开发新的器件

一是根据器件本身的特点提出。例如 MOS 门控晶闸管(MCT),虽经十几年的研制,由于结构、工艺复杂,合格率低,成本高,没有达到期望的 4.5kV/2kA 的水平而暂被搁置,但有望具有 MOS 管优良的开关特性和晶闸管非常低的通态压降,并易于得到高的耐压,仍可能继续研制。

(三)走集成化之路

经历标准模块、智能模块,现在又发展到用户专用功率模块(ASPM)阶段。ASPM 是把一台(套)电力电子装置(系统)的所有硬件尽量以芯片形式封装在一个模块内。这样,装置(或系统)的体积达到最小,所有引线减至最少,寄生电感、电容降到最低,可靠性大为提高。它将有助于实现电能变换和信息处理的集成化和高频化。

(四)寻找新材料

至今,许多实用的电力电子器件均是由硅材料制成的,它们已发展得相当成熟。为了进一步实现对理想功率器件特性的追求,人们逐渐转向对新型半导体材料制作新型半导体功率器件的探求,近年来还出现了很多性能优良的新型化合物半导体材料,如砷化镓(GaAs)、碳化硅(SiC)、磷化铟(InP)及锗化硅(SiGe)等。由它们作为基础材料制成的电力电子器件正不断涌现。

电力电子器件作为电力电子技术发展的主导器件,是电力电子技术的发展的决定性因素,电力电子器件的未来将充满生机,它的发展与提高必将推动电力电子技术的飞速发展,

本章小结

电动机作为把电能转换为机械能的主要设备,电力拖动是指以电动机为原动机驱动生产机械的系统的总称,目的是将电能转变为机械能,实现生产机械的起停以及调速,完成各种生产工艺过程的要求,保证生产过程的正常运行。

在现代工业中,为了实现生产过程自动化的要求,电力拖动不仅包括拖动生产机械的电



动机,而且包括控制电动机的一整套控制系统,有直流调速系统和交流调速系统。由于直流电动机本身结构上存在机械式换向器和电刷这一致命弱点,这给直流调速系统的开发和应用带来了一系列限制。实践证明,交流调速技术的应用为工农业生产及节省电能方面带来了巨大的经济和社会效益。现在,交流调速系统已逐步取代直流调速系统。交流调速在电气传动领域占据了统治地位已是公认的事实。

电力电子技术是利用功率半导体器件及控制技术对电能进行变换和控制的技术。按照对电能形态的变换,有直流变交流、交流变直流、直流变直流、交流变交流的变换。完成变换技术的装置称为变换器,也叫变流器。交—直—交变频器把恒压恒频电源变成了电压大小可变频率可调的交流电。功率半导体器件是变流器的核心部件,从控制角度分类,有不可控型,如大功率二极管;半控型,如晶闸管;全控型(也叫自关断型),如可关断晶闸管、大功率晶体管、大功率场效应晶体管、绝缘栅双极型晶体管。特点是:工作在开关状态,导通时流过大电流,压降很小;关断时承受大电压,漏电流很小;用小信号控制导通及关断;开关频率很高。总之,功率半导体器件接近理想开关。

课后练习

1. 为什么交流变频调速会取代直流调速?
2. 简述变频调速技术的发展趋势。
3. 如何控制晶闸管导通?导通后怎样使其关断?
4. 大功率双极型晶体管和大功率场效应晶体管相比有何优缺点?
5. 绝缘栅双极型晶体管有何优点?
6. 举例说明目前有哪些新材料用于制造功率半导体器件。

第二章 直流电动机及电力拖动

章前导语

电动机有直流电动机和交流电动机两大类。与交流电动机相比,直流电动机的结构复杂,消耗较多的有色金属,维修比较麻烦。但由于长期以来交流电动机的调速问题未能得到满意的解决,在此之前,直流电动机具有交流电动机所不能比拟的良好的起动性能和调速性能。到目前为止,直流电动机由于其性能优越,在电力拖动自动控制系统中仍占有很重要的地位。利用晶闸管整流电源配合直流电动机而组成的调速系统仍在使用。直流电动机多用于对调速要求较高的生产机械上,如轧钢机、电力牵引、挖掘机械、纺织机械等等,这是因为直流电动机具有以下突出的优点:

1. 调速范围广,控制特性优异;
2. 具有高动态响应特性;
3. 具有平稳的低速运行特性;
4. 对整流器的要求简单。

本章主要介绍直流电机的基本结构、工作原理,特别是直流电动机的机械特性,直流电动机的起动、调速和制动的各种方法。

第一节 直流电动机的基本结构和工作原理

学习目标

1. 掌握直流电机的工作原理;
2. 了解直流电机的主要结构和各部分的主要作用;
3. 掌握直流电动机的铭牌数据的含义;
4. 熟练掌握直流电机的电枢电动势和电磁转矩的计算公式和性质;
5. 掌握如何判断一台电机是处于电动状态还是发电状态;
6. 理解直流电机的电枢反应。

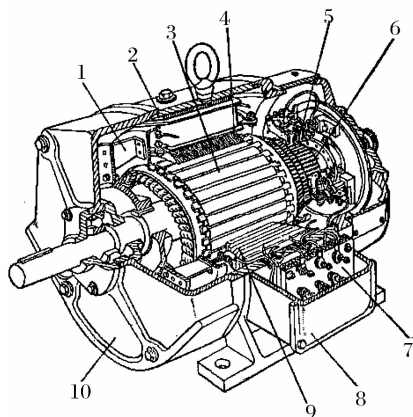
一、直流电机的基本结构

讨论电机结构的主要目的,是要了解电机各主要部件的名称、作用、形状、使用的材料以



及怎样组装起来的。通常将电机中使用的材料分为四大类：第一类是导电材料，用以构成电路，常用铝或铜材质成；第二类是导磁材料，用以构成磁路，常用 0.35mm 或 0.5mm 厚的两面涂有绝缘漆的硅钢片叠成；第三类为绝缘材料，用此把带电部分分隔开来，用云母、瓷等材料制成，按国际电工协会规定，绝缘材料的绝缘等级共分 Y, A, E, B, F, H, C 七级，常用的有五个等级，每个等级的极限规定了允许温度；第四类为结构材料，用钢铁和铝合金制成。

直流电机是由静止的定子部分和转动的转子部分构成的，定、转子之间有一定大小的间隙(称为气隙)。如图 2-1 所示是一台直流电机的结构图。下面简要介绍它的主要部件。



1. 风扇；2. 机座；3. 电枢；4. 主磁极；5. 刷架；6. 换向器；7. 接线板；8. 出线盒；9. 换向极；10. 端盖

图 2-1 直流电机的结构图

(一)定子

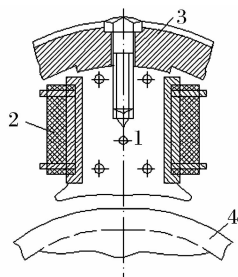
直流电机定子的作用是产生磁场和作为电机机械的支撑。它主要由主磁极、换向极、机座、端盖和电刷装置等组成。

1. 主磁极

其作用是能够在电枢表面外的气隙空间里产生一定形状分布的气隙磁密。主磁极由铁心和励磁绕组组成。主磁极铁心包括极身和极靴两部分，如图 2-2 所示。为降低由于转子转动时齿、槽移动造成极靴表面的磁密变化而引起的铁心涡流损耗，主磁极的铁心用 1mm ~ 1.5mm 厚的低碳钢板冲片叠压紧固而成。把事先绕制好的励磁绕组套在主极铁心外面，整个主磁极再用螺钉固定在机座的内表面上。各主磁极上的励磁绕组联接必须使通过励磁电流时，相邻磁极的极性呈 N 极和 S 极交替的排列。为了减小气隙中有效磁通的磁阻，改善气隙磁密的分布，磁极下的极靴比极身宽，这样也可使励磁绕组牢固地套在磁极上。

2. 换向极

其作用是消除电机带负载时换向器产生的有害火花，以改善换向，容量在 1KW 以上的直流电机均应安装换向极。换向极的形状比主磁极简单，也是由铁心和绕组构成(如图 2-3 所示)。铁心一般用整块钢或钢板加工而成。换向极安装在相邻两主磁极之间的几何中性线上，换向极绕组与电枢绕组串联。



1. 主极铁心;2. 励磁绕组;3. 机座;4. 电枢

图 2-2 直流电机的主磁极

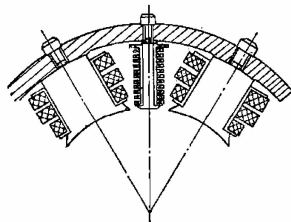


图 2-3 中型电机的主极和换向极

3. 机座

机座一方面用来固定主磁极、换向极和端盖等,并作整个电机的支架用地脚螺钉将电机固定在基础上;另一方面也是电机磁路的一部分,称为定子磁轭,所以用铸钢或者是钢板制成。

4. 电刷装置

电刷装置是把直流电压、直流电流引入或引出的装置,包括电刷及电刷座等,它们固定在定子上,电刷与换向器保持滑动接触,以便将电枢绕组和外电路接通。

5. 端盖等

机座的两边各有一个端盖。端盖的中心处装有轴承,用来支撑转子的转轴。

(二)转子

直流电机转子部分主要由电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等组成。由于感应电势和电磁转矩都在转子绕组中产生,是机械能与电能相互转换的枢纽,因此称作电枢。图 2-4 为直流电机的电枢和换向器。

1. 电枢铁心

电枢铁心是主磁通磁路的一部分,当电枢在磁场中旋转时,铁心将产生涡流和磁滞损耗,为减少损耗,提高效率,电枢铁心一般用 0.5mm 厚的涂有绝缘漆的硅钢片叠压而成,呈圆柱形,电枢铁心沿圆周上有均匀分布的槽,槽内嵌放电枢绕组(如图 2-5 所示)。为防止低速运转时的转矩变化,电枢槽制成平行的斜纹,如图 2-4 所示。

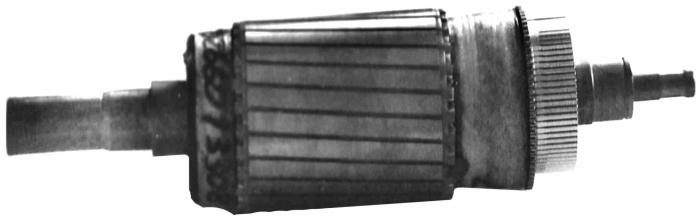


图 2-4 直流电机的电枢和换向器(带斜纹电枢)

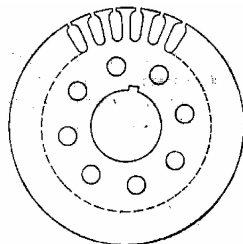


图 2-5 电枢铁心冲片

2. 电枢绕组

电枢绕组的作用是通过电流和感应产生电动势以实现机电能量的转换。绕组一般由铜



线绕成,包上绝缘后嵌入电枢铁心的槽中,然后用槽楔将绕组导体楔在槽内,以防止离心力将绕组甩出槽外。

3. 换向器(又称整流子)

在直流发电机中,它的作用是将绕组内的交变电动势转换为电刷端上的直流电动势;在直流电动机中,它将电刷上所通过的直流电流转换为绕组内的交变电流,并保证每一磁极下,电枢导体的电流的方向不变,以产生恒定的电磁转矩。换向器安装在转轴上,主要由许多彼此绝缘的铜片组合而成,这些铜片称为换向片,每个换向片都和电枢绕组连接。

(三)气隙

在静止的主磁极与电枢之间,有一空气隙。它的大小和形状对电机性能影响很大。空气隙的大小随容量不同而不同,小型电机的空气隙约为 $1\text{mm}\sim 3\text{mm}$,大型电机的空气隙约为 $10\text{mm}\sim 12\text{mm}$ 。空气隙虽小,但由于空气得磁阻较大,因而在电机磁路系统中有着重要的影响。

二、直流电机的工作原理

图 2-6 是一台直流电机的工作原理简图。电机具有两个磁极 N、S 组成(一般是电磁铁,也可以是永久磁铁),电枢绕组只是一个线圈 abcd。线圈的两端分别接到两个换向片上,在换向片上分别放上两个固定不动的电刷 A 和 B。直流电机作为发电机运行时,当原动机拖动电枢以恒速 n 逆时针方向在磁场中转动时,在线圈边(即导体)ab 和 cd 中有感应电动势 e 产生。感应电动势 e 的大小由式(2-1)确定。

$$e = Blv \quad (2-1)$$

式中: B 为导体所在处的磁密(Wb/m^2 , 韦/米²);

l 为导体 ab 或 cd 的长度(m, 米);

v 为导体 ab 或 cd 与 B 之间的相对线速度(m/s, 米/秒)。

感应电动势的方向由右手定则确定。把右手手掌伸开大拇指与其他四指成 90° ,如果让磁感应线指向手心,大拇指指向导体运动方向,其他四指的指向就是导体中感应电动势的方向。据此可判断出图 2-6 所示瞬间的方向。显然,每一个线圈边中的电动势是交变的,即在 N 极是一个方向,当转到 S 极下时是另一个方向。但是电刷 A 总是与 N 极下的导体相连的换向片接触,电刷 B 总是与 S 极下的导体相连的换向片接触,因此在电刷间出现一个极性不变的电动势或电压,所以换向器的作用在于将电枢线圈中感应的交变电动势变换成电刷之间的不变的直流电动势的原理。当电刷之间接有负载时,在电动势的作用下就在电路中产生一定方向的电流。

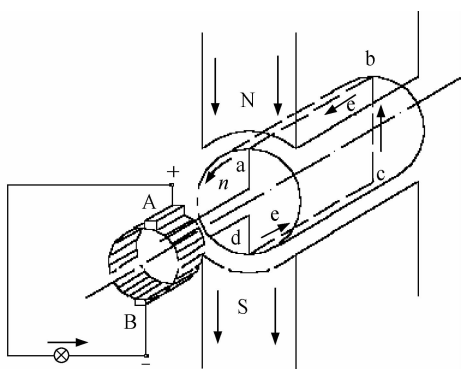


图 2-6 直流发电机的原理

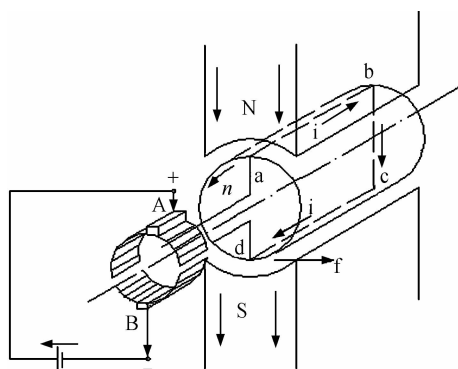


图 2-7 直流电动机的原理

直流电机作为电动机运行时,如图 2-7 所示,将电枢绕组通过电刷 A、B 接到直流电源上,绕组的转轴与机械负载相连,电流的方向为:N 极下的导体 ab 中的电流总是一个方向,S 极下的导体 cd 中的电流总是另一个方向,这样才能使两个导体上受到的电磁力方向一致,电枢因而转动。根据电磁力定律,载流导体 ab 或 cd 都与气隙磁密 B 垂直,作用在导体上的电磁力 f 为

$$f = Bli \quad (2-2)$$

式中: i 为导体中的电流(A,安)。

其方向用左手定则确定。即把左手伸开,大拇指和其他四指成 90 度,如果磁感线指向手心,其他四指指向导体中电流的方向,大拇指的指向就是导体受力的方向。如图 2-7 所示瞬间,导体 ab 或 cd 中所受的电磁力为逆时针方向。因此,当导体 ab 或 cd 从 N(S)极下转到 S(N)极下时,其中电流的方向必须改变,以使电磁力的方向不变,这也是必须通过换向器才实现的。另外,当电枢在磁场中转到时,线圈中也要产生感应电动势 e ,这个电动势的方向(由右手定则确定)与电流或外加电压的方向总是相反,所以称为反电动势,它与发电机中电动势的作用是不同的。

从上述基本电磁情况来看,一台直流电机原则上既可以作为发电机运行,也可以作为电动机运行,只是其输入输出的条件不同而已。如用原动机拖动直流电机的电枢,将机械能从电机轴上输入,而电刷上不加直流电压,则从电刷端可以引出直流电动势作为直流电源,可输出电能,电机将机械能转换成电能而成为发电机;如在电刷上加直流电压,将电能输入电枢,则从电机轴上输出机械能,拖动生产机械,将电能转换成机械能而成为电动机。这种同一台电机,既能作发电机又能作电动机运行的原理,在电机学理论中称为电机的可逆原理。

三、直流电机的铭牌数据

在每台电机的铭牌上都标注了电机的型号、额定值和额定运行情况下的有关技术数据,如表 2-1 和表 2-2 所示。铭牌上的额定值及有关技术数据是选用、安装和维修电机的依据,同时用以规定电动机正常运行状态和条件。直流电机的铭牌数据主要包括以下几个方面: