

基础导论

一、电磁感应原理

电磁感应原理是电机最基本的工作原理。因此,要想知道电机的工作原理及性能,必须具备电、磁方面的基础知识。在电工基础课程中,已经学习了有关电路及磁路方面的知识。为了进一步掌握电机、变压器的工作原理及性能,需要准备必要的基础知识,下面对磁路方面的知识进行复习和补充。

1. 安培力

通过电工基础的学习,已经知道了在永磁体及通电导线周围存在着磁场,但是,怎样表示磁场的强弱呢? 磁场最基本的特性是对磁场中的通电导体有力的作用,研究磁场的强弱就是从分析通电导体在磁场中的受力情况入手。

磁场对载流导体施加的力称为安培力。在匀强磁场中,若载流直导线与磁感应强度 B 方向垂直、导体的有效长度为 l , 流过导体的电流为 i , 载流导线所受的力为 F , 则

$$F = Bil \quad (0-1)$$

用左手定则确定 F 的方向, 即把左手伸开, 大拇指与其他四指成 90° 。如果磁力线指向手心, 其他四指指向导线中电流的方向, 则大拇指指向的就是导线受力的方向。图 0-1 表示了 F 、 B 与 i 三者之间的方向关系。

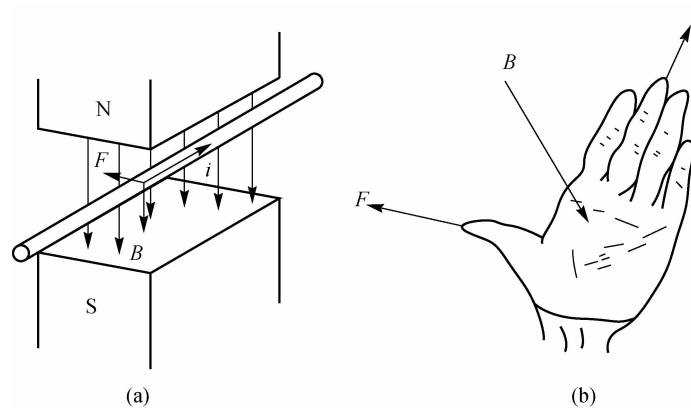


图 0-1 载流导体在磁场内受到的安培力及左手定则

2. 磁感应强度

描述磁场强弱及方向的物理量是磁感应强度(或磁通密度),用 B 表示。

磁感应强度 B 与产生它的电流之间的关系用毕奥-萨伐尔定律描述,磁力线的方向与电

流的方向满足右手螺旋关系,如图 0-2 所示。

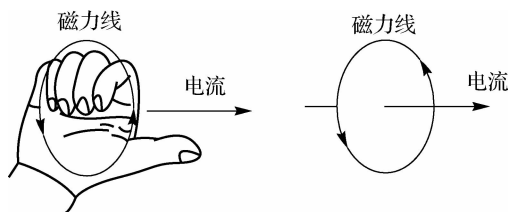


图 0-2 右手螺旋关系

为了形象地描绘磁场,常采用磁力线,磁力线是无头无尾的闭合曲线。如图 0-3 所示,分别画出了直线电流、圆电流和螺线管电流产生的磁力线。

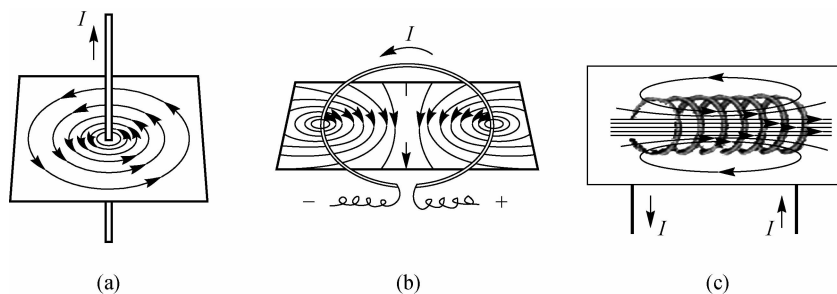


图 0-3 磁力线

3. 磁通和磁场强度

1) 磁通

磁感应强度 B 描述的只是空间某一点的磁场,若要描述一个给定面上的磁场,就要用到另一个物理量,即磁通量,简称磁通。如果在匀强磁场中有一个与磁场方向垂直的平面,面积为 A ,则磁通 Φ 为

$$\Phi = BA \quad (0-2)$$

式中, B 为磁感应强度, T; A 为面积, m^2 ; Φ 为磁通, Wb。如果 B 的单位采用 Gs, A 的单位采用 cm^2 , 此时 Φ 的单位是 Mx , 且有

$$1 \text{ Mx} = 10^{-8} \text{ Wb} \quad (0-3)$$

磁感应强度可以看成是单位面积内的磁通,所以磁感应强度又称为磁通密度。

2) 磁场强度

磁场强度 H 是计算磁场时引用的物理量单位为安培/米(A/m)。

$$B = \mu H$$

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

式中, μ 为导磁物质的磁导率; μ_0 为真空中的磁导率; μ_r 为相对磁导率,非铁磁材料的相对磁导率近似为 1。

4. 铁磁材料的磁化特性

1) 铁磁材料的磁化

将铁、镍和钴等铁磁材料放进磁场后,磁场将明显增强,铁磁材料呈现很强的磁性,这种现象称为铁磁材料的磁化。

2) 起始磁化曲线和磁滞回线

(1) 起始磁化曲线。将一块未磁化的铁磁材料进行磁化,当磁场强度 H 由零逐渐增加

时,磁感应强度 $B=f(H)$ 描述的曲线就称为起始磁化曲线,其形状如图 0-4(a) 所示。这是铁磁材料的原始磁化特性,它与平均磁化特性差距甚小。当 H 从零增大时, B 随 H 增加较慢。在 ab 段随着 H 的增加, B 增加较快。在 bc 段随着 H 的增加, B 增加非常缓慢,称为磁化曲线的饱和段。最后为 cd 段,又呈直线。其中 a 称为附点, b 点为膝点, c 点为饱和点。经过饱和点之后,铁磁材料的磁导率趋近于 μ_0 。

(2)磁滞回线。如图 0-4(b) 所示,当 H 从零增加到 H_m 时, B 相应地从零增加到 B_m 。然后再逐渐减小 H , B 值将沿曲线 ab 下降。当 $H=0$ 时, B 值并不等于零,而是 B_r ,这就是剩磁。

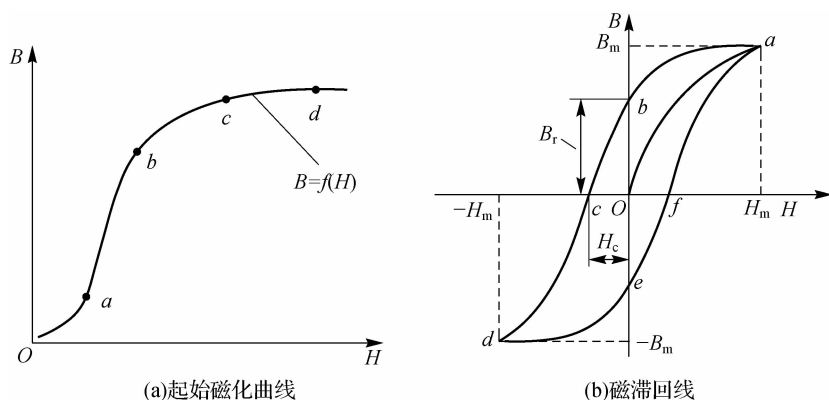


图 0-4 起始磁化曲线和磁滞回线

当 H 在 H_m 和 $-H_m$ 之间反复变化时,呈现磁滞现象的 $B-H$ 闭合曲线,称为磁滞回线。

铁磁材料的磁导率 μ 比空气的磁导率 μ_0 大几千倍到几万倍。对于铁磁材料,磁导率 μ 除了比 μ_0 大得多外,还与磁场强度以及铁磁材料磁状态的历史有关,所以铁磁材料的磁导率 μ 不是一个常数。在工程计算中,不按公式 $H=B/\mu$ 进行计算,而是事先把各种铁磁材料用实验的方法,测出它们在不同磁场强度 H 下对应的磁通。 $B-H$ 曲线不是单值的,而是具有磁滞回线的特点,即在同一个大小的磁场强度 H 下,对应着两个磁通 B 值,这就是说,究竟是对应着哪一个磁通 B 值还要看铁磁材料工作状态的历史情况。当铁磁材料的磁滞回线较窄时,可以用它的平均磁化曲线即基本磁化曲线来进行计算。这样 B 与 H 之间便呈现单值关系。顺便还要指出,磁化特性的另一个特点是具有饱和性。

磁滞回线较窄的铁磁材料属于软磁材料,如硅钢片、铁镍合金和铸钢等。这些材料的磁导率较高,磁滞回线包围面积小,磁滞损耗小,多用于制作电机、变压器的铁心。而硬磁材料,如钨钢、钴钢等,其磁滞回线较宽,主要用作永久磁铁。

课堂体验

课堂体验 1: 电磁线圈控制原理体验

交流接触器一个,对其通入交流 220 V 电源,观察其工作情况。模拟由于紧固不当而导致

的声音加大,模拟铁心断面有杂质而导致的声声音加大,模拟短路环断裂而造成的声声音过大。

叙述体验过程及观察到的现象。

回答:

课堂体验 2: 电磁磁化现象体验

交流电磁铁一个,对其通入交流 220 V 电压,观察其工作情况。断开对其施加的电源,用螺丝刀接触铁心断面并轻轻拉动,感受磁化效果。

叙述体验过程及观察到的现象。

回答:

二、变压器的基本概念

1. 变压器的概念

变压器是基于电磁感应原理工作的一种电能转换设备,其转换的媒介是磁通。变压器有一次和二次两个绕组,分别被磁通所链接,如图 0-5 所示。

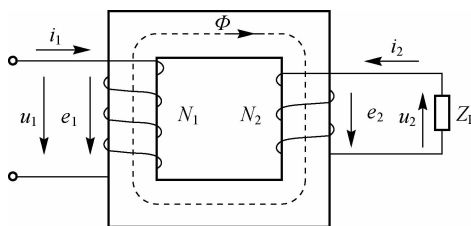


图 0-5 变压器电磁转换原理

铁心和绕组是变压器实现电磁转换的主要核心,两个绕组套在铁心上。线圈之间只有磁的耦合,没有电的连接。其中一次绕组与电源相连,用来接收交流电能;二次绕组与负载相连,用来输出交流电能。

对于负载来说,变压器相当于电源,其额定容量 S_N 与电压、电流遵循如下公式。

$$S_N = U_N I_N \quad (0-4)$$

式中, S_N 为变压器的额定容量,kVA; U_N 为变压器的额定电压,V 或 kV; I_N 为变压器的额

定电流, A 或 kA。

变压器一经确定, 其容量即为常数, 所以, 电压和电流之间成反比关系。

2. 变压器的主要分类

变压器按照功能的不同可分为电力变压器、控制变压器、特殊用途变压器等, 具体分类如图 0-6 所示。

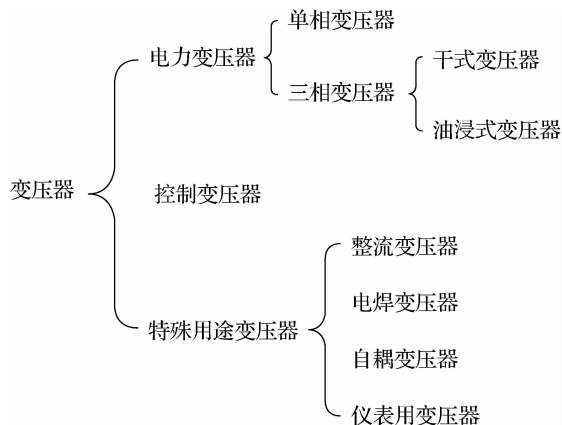


图 0-6 变压器的分类

1) 电力变压器

电力变压器主要用于供、配电, 它分为单相变压器和三相变压器, 而三相变压器又分为干式变压器和油浸式变压器。干式变压器主要用于小型电力变压器, 中大型电力变压器都做成油浸式。如图 0-7 所示, 电力变压器的主要部件包括器身、油箱、冷却装置、保护装置、出线装置等。

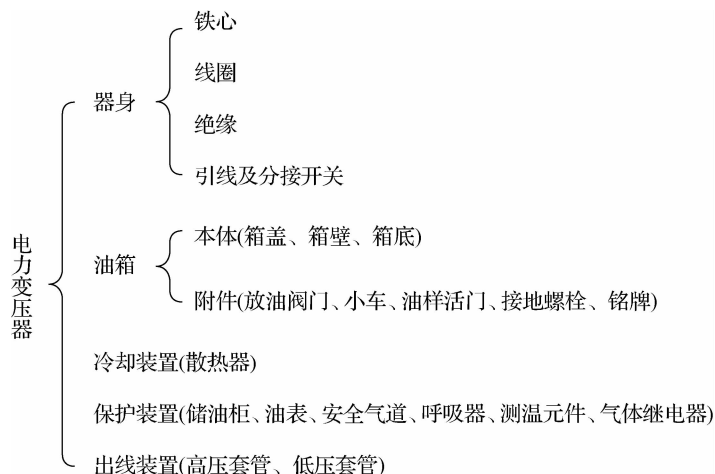


图 0-7 电力变压器主要部件

2) 控制变压器

控制变压器主要用来为机床电气控制提供不同等级的控制电源, 通常一次侧可接电源 AC: 380 V、220 V; 二次侧输出 AC: 110 V、36 V、24 V、12 V、6 V 等。控制变压器所带的负载一般为控制电器或机床照明等。

3) 特殊用途变压器

特殊用途变压器包括整流变压器、电焊变压器、自耦变压器、仪表用变压器等。整流变压器一般用于电力电子设备中,可用于交/直流变换。电焊变压器可用于电焊机或点焊机使用。自耦变压器(调压器)可用来进行交流电源的调节或鼠笼型异步电动机的起动。仪表用变压器包括电压互感器、电流互感器等,主要用来进行电气信号的测量。

3. 变压器的基本特性

当变压器一次绕组两端加交流电压 u_1 时,绕组中便有与 u_1 相同频率且与一、二次绕组同时交链的交变磁通 Φ 产生。根据电磁感应原理,主磁通在两个绕组中感应出相同频率的电动势 e_1 和 e_2 。

$$u_1 = e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-5)$$

$$u_2 = e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-6)$$

式中, N_1 为一次绕组的匝数; N_2 为二次绕组的匝数。

由式(0-5)、式(0-6)可知,变压器一、二次绕组感应电动势的大小正比于匝数。因此,只要改变一、二次绕组的匝数比,便可改变输出电压的大小。即

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (0-7)$$

变压器二次绕组的感应电动势 e_2 实际是一个输出电源,当二次绕组连接负载时,负载就会消耗电能实现其他能量的转换。

当变压器连接负载后,二次侧就会产生感应电流,在忽略损耗的情况下,可认为一、二次的磁势相等。即

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (0-8)$$

由式(0-8)可知,变压器的一、二次电流与变压器的匝数成反比。

课堂体验

课堂体验 3: 变压器的运行特性体验

变压器(AC 220 V/AC 24 V; 100 VA)一次侧接通交流 220 V 电源,二次侧连接白炽灯(24 V, 40 W),观察白炽灯的亮度。减小一次侧供电电源的电压,观察白炽灯的亮度变化。

叙述体验过程及观察到的现象。

 回答:

课堂体验 4: 电流卡表的测量体验

接通交流电动机的供电电源,观察其工作情况。使用钳形卡表测量其电流的大小。减小供电电源并再次用卡表进行测量。

叙述体验过程及观察到的现象。

 回答:

三、电机的基本概述

1. 电机的概念

电机是发电机(机械能转化为电能)和电动机(电能转化为机械能)的统称,它是一种利用电磁感应定律和电磁力定律,将能量或信号进行转换或变换的电磁机械装置。一般发电机在电路中用字母 G 表示,它的主要作用是将机械能转化为电能,目前最常用的是利用热能、水能、风能等推动发电机转子旋转来发电。电动机在电路中用字母 M 表示,它的主要作用是产生驱动转矩,作为用电器或各种机械的动力源。

电机是电气化的核心,是机电一体化的重要基础,所以,电机工业是机械工业的重要组成部分。随着国民经济和科学技术的不断发展,电机工业的发展不断深化、完善,对国民经济的发展起着重要的作用。

2. 电机的主要分类

电机主要包括直流电机和交流电机。电机的具体分类如图 0-8 所示。

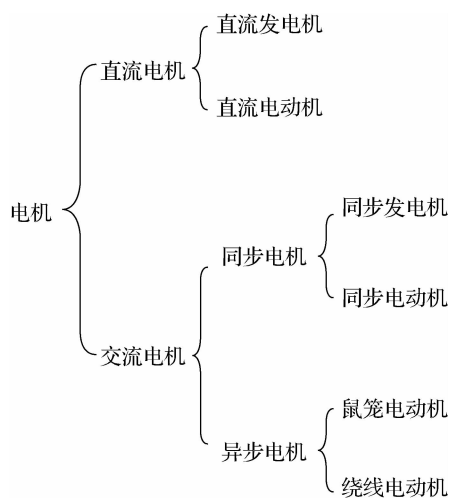


图 0-8 电机的分类

1) 直流电机

直流电机是电机的主要类型之一,一台直流电机既可作为发电机使用,也可作为电动机使用,能够实现直流电能和机械能之间的相互转换。

直流电机有以下特点。

(1)直流电动机具有宽广的调速范围,平滑的无级调速特性,可实现频繁的无级快速启动、制动和反转。

(2)过载能力大,能承受频繁的冲击负载,能满足自动化生产系统中各种特殊运行要求。

(3)直流发电机能提供无脉动的大功率直流电源,电势波形较好,对电磁干扰的影响小,且输出电压容易精确地调节和控制。

(4)制造工艺复杂,消耗有机金属较多,生产成本低。

(5)由于直流电机运行时电刷和换向器之间容易产生火花,因而可靠性较差,维护保养困难。

根据励磁方式的不同,直流电机可分为四种类型,即他励直流电机、并励直流电机、串励直流电机和复励直流电机。

2) 交流电机

交流电机是用于实现机械能和交流电能相互转换的驱动设备,已成为最常用的电机。交流电机结构简单,制造方便,比较牢固,容易做成高转速、高电压、大电流、大容量的电机。交流电机功率的覆盖范围很大,从几瓦到几十万千瓦,甚至上百万千瓦。

由图 0-8 可知,交流电机分为同步电机和异步电机两大类。同步电机可用来作为发电机和电动机使用,其中,同步电动机的转速与所接电网的频率之间存在着严格不变的关系。异步电机主要用于电动机使用,它通常分为鼠笼型异步电动机和绕线型异步电动机。异步电动机的定子绕组由电源供给励磁电流,建立磁场,由于电磁感应的作用,使转子绕组感生电流,产生电磁转矩,实现机电能量转换。因其转子电流是由电磁感应作用而产生的,所以也称为感应电动机。

3. 电动机拖动

用电动机拖动生产机械的拖动方式,称为“电机拖动”或“电力拖动”。与其他原动机相比,电动机的控制方法更为简便,并且可以实现遥控和自动控制。电力拖动系统主要由电动机、传动机构和控制设备(包括反馈装置)三个基本环节组成。反馈装置往往也是用控制电机来实现反馈功能的。例如,可用测速发电机检测电动机的转速,用旋转变压器检测电动机的角位移,用感应同步器检测工作机械的位移等。电力拖动框图如图 0-9 所示。

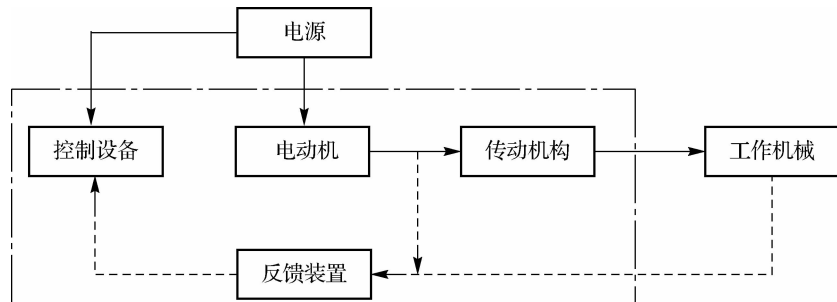


图 0-9 电力拖动框图

4. 电动机的主要应用

直流电动机应用广泛。应用最广的是直流电动工具,电动工具取代手工工具,已广泛应用于机械、建筑、机电、冶金设备的安装,桥梁架设,住宅装修,农牧业生产,医疗、卫生等各个方面。并且广为个体劳动者及家庭使用,是一种量大面广的机械化工具,发展前景十分广阔。此外,在许多工业部门,如大型轧钢设备、大型精密机床、矿井卷扬机、市内电车、电缆设备要求严格线速度一致的地方等,通常都采用直流电动机作为原动机来拖动工作机械。直流电动机作为原动机带动各种生产机械工作,向负载输出机械能。在控制系统中,直流电机还有其他的用途,如测速电机、伺服电机等。

直流电动机的发展经历了 100 多年,因而电动机自身的理论已经基本成熟。随着电工技术的发展,对电能的转换、控制以及高效使用的要求越来越高。电磁材料的性能不断提高,电工电子技术的广泛应用,为电动机的发展注入了新的活力。未来电动机将会沿着体积更小、机电能量转换效率更高、控制更灵活的方向继续发展。

同步电机主要用作发电机,也可以用作电动机。同步电动机的功率因数较高,在要求改善功率因数的条件下,不调速的大功率电机选用同步电动机。同步电动机也用于负载变化时要求转速恒定不变的情况。

异步电动机分为单相异步电动机和三相异步电动机两大类。单相异步电动机用于只有单相电源的家用电器和医疗设备中。三相异步电动机具有结构简单、制造方便、价格低廉、运行可靠等优点,还具有较高的运行效率和较好的运行特性,从空载到满载接近恒速运行,在工业生产、农业机械化、民用电器等方面应用广泛、需求量居各种电机之首(占 90%左右),在电网总负荷中,异步电动机占 65%左右。

起动转矩、调速性能要求不高的各种机床、水泵、通风机可选用普通鼠笼型异步电动机;功率不大,有级调速的电梯等可选用多速电动机;而调速范围较大,调速要求平滑的龙门刨床、高精度机床、可逆轧钢机等选用变频调速的同步电动机或异步电动机。

课堂体验

课堂体验 5: 直流电动机的运行体验

接通直流电动机的供电电源,观察其工作情况。调整直流电源的大小,测试直流电动机的转速变化。

叙述体验过程及观察到的现象。

 回答:

课堂体验 6:交流电动机的运行体验

接通交流电动机的供电电源,观察其工作情况。断开对其施加的电源,改变其供电的相序,继续供电并观察其工作情况。

叙述体验过程及观察到的现象。

 回答:

问题与思考

问题 1 电磁控制的主要特点是什么?

思考并回答:

.....

.....

.....

.....

问题 2 电机的主要作用是什么? 主要用在哪些地方?

思考并回答:

.....

.....

.....

.....

问题 3 变压器的主要特点是什么? 主要分类有哪些?

思考并回答:

.....

.....

.....

.....

四、控制电机基本概述

1. 控制电机的概念

控制电机一般是指在自动控制系统中作为执行元件或测量元件使用的电气单元,它是在普通旋转电机的基础上发展起来的,其工作原理与普通旋转电机并无本质区别,都是基于各种电磁理论,只是它们的用途有所不同。控制电机主要用来完成控制信号的传递和变换。因此,现代控制系统对它的基本要求是高精确度、高灵敏度和高可靠性。

1) 高精确度

高精确度是指控制电机的实际特性与理想特性的差异应越小越好。对功率元件来说,是指其特性的线性度和不灵敏区;对信号元件来说,则主要指静态误差、动态误差以及环境温度、电源频率和电源电压的变化所引起的漂移。这些特性都直接影响整个系统的精确度。

2) 高灵敏度

高灵敏度是指控制电机的输出量应能迅速跟上输入信号的变化,即对输入信号能做出快速响应。目前,自动控制系统中的控制指令是经常变化的,有时极为迅速,因而控制电机、特别是功率元件能否对输入信号做出快速响应是至关重要的。高灵敏度表征快速响应的主要指标有灵敏度和机电时间常数等。

3) 高可靠性

高可靠性是指控制电机对不同的使用环境应有广泛的适应性,在较差的环境中能非常可靠地工作,以保证控制系统的正常运行。

2. 控制电机的分类

控制电机的功能和用途尽管各不相同,但大致上仍然可以分为执行元件类控制电机和测量元件类控制电机两大类。由于控制电机的种类非常多,这里只介绍几种相对较为常见的控制电机。控制电机的分类如图 0-10 所示。

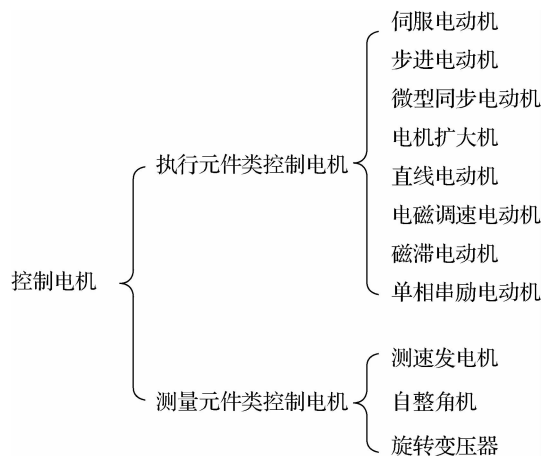


图 0-10 控制电机的分类

1) 执行元件类控制电机

(1) 伺服电动机。伺服电动机根据其电源的类型可分为直流伺服电动机和交流伺服电

动机。直流伺服电动机的转速和转向取决于控制电压的大小和极性,而交流伺服电动机的转速和转向取决于控制电压的大小和相位。在控制系统中,伺服电动机作为执行元件,机械特性近于线性,即转速随转矩的增加近似线性下降,比普通电动机的控制精度高。使用时,伺服电动机通常经齿轮减速后带动负载,将输入的电压信号变换成电机轴上的角位移和角速度等机械信号输出,所以又称为执行电动机。

(2)步进电动机。步进电动机是一种将脉冲信号转换为相应的角位移或线位移的机电元件。它由专门的电源供给脉冲信号电压,再由相应的驱动器将脉冲信号转换成电压相序的变化信号。当输入一个电脉冲信号时,步进就前进一步,输出角位移量或线位移量与输入脉冲数成正比,而转速与脉冲频率成正比。步进电动机在经济型数控系统中作为执行元件得到广泛应用。

(3)微型同步电动机。微型同步电动机主要有三种类型,即永磁式同步电机、反应式同步电机和磁滞式同步电机。不同类型的微型同步电机的定子结构都是相同的,或者是三相绕组通以三相交流电,或者是两相绕组通以两相电流(包括单相电源通过电容分相),或者是单相罩极式,其主要作用都是产生一个旋转磁场。但其转子的结构形式和材料却有很大差别,因而其运行原理也就各不相同。由于这类电机的转子上没有励磁绕组,也不需要电刷和滑环,所以微型同步电动机具有结构简单、运行可靠、维护方便、转速恒定等特点,广泛应用于自动控制系统和其他需要恒定转速的仪器上。

(4)电机扩大机。电机扩大机可以利用较小的功率输入来控制较大的功率输出,在系统中作为功率放大元件。电机扩大机的控制绕组上所加的电压一般不高,励磁电流不大,而输出电动势较高,电流较大,这就是功率放大。电机扩大机的放大倍数可达1 000~10 000倍,也可作为自动调节系统中的调节元件。

(5)直线电动机。直线电动机就是把电能转换成直线运动的机械能的电动机。它解决了直线运动系统总是需要用中间传动机构将旋转运动转换成直线运动的问题,因而其系统结构简单,运行效率和传动精度都较高。与旋转电动机相对应,直线电动机也可以分为直线异步电动机、直线同步电动机、直线直流电动机等。

(6)电磁调速电动机。电磁调速电动机是采用电磁转差离合器调速的异步电动机。这种电动机可以在较大的范围内进行无级平滑调速,是交流无级调速设备中最简单实用的一种,在纺织、印染、造纸等轻工业机械中得到广泛应用。

(7)磁滞电动机。磁滞电动机具有恒速特性,亦可在异步状态下运行,主要用于驱动功率较小、要求转速平稳和起动频繁的同步驱动装置中。

(8)单相串励电动机。单相串励电动机可交直流两用,多数情况下使用交流电源。由于它具有较大的起动转矩和较软的机械特性,广泛应用于电动工具中,如手电钻就采用这种电动机。

2) 测量元件类控制电机

(1)测速发电机。测速发电机是机械转速测量装置,它的输入是转速,输出是电压,其输出电压与转速精确地保持正比关系。根据其输出电压信号的不同,测速发电机又可分为直流测速发电机和交流测速发电机两种。测速发电机也可作为微分、积分的计算元件来使用。

(2)自整角机。自整角机的基本用途是传输角度数据,一般由两个以上元件对接使用,

输出电压信号时是测量元件,输出转矩时是执行元件。作为测量元件时,输出电压是两个元件转子角差的正弦函数。作为执行元件时,输出转矩也近似为两个元件转子角差的正弦函数。自整角机在伺服系统中可作为自整步元件或角度的传输、变换、接收元件。

(3)旋转变压器。普通旋转变压器都做成一对磁极,其输出电压是转子转角的正弦、余弦或其他函数,主要用于坐标变换、三角运算,也可作为角度数据传输和移相元件使用。多极旋转变压器是在普通旋转变压器的基础上发展起来的一种精度可达角秒级的元件,在高精度解算装置和多通道系统中用作解算、检测元件或实现数模传递。

3. 控制电机的典型应用

在科学技术高速发展的今天,控制电机已经是构成各类控制系统的基础元件,广泛应用于各行各业,如钢铁冶金、加工制造、能源化工、交通通信等。不管是在数控机床、自动化仪器和仪表、电影、电视、打印机、电子计算机外设等民用设备上,还是雷达天线自动定位、飞机自动驾驶仪、导航仪、激光和红外线技术、导弹和火箭的制导、自动火炮射击控制、舰艇驾驶盘和方向盘的控制等军事设备上,都能够见到控制电机的广泛应用。

这些控制设备能够处理包括直线位移、角位移、速度、加速度、温度、湿度、流量、压力、液面高低、密度、浓度、硬度等多种物理量。

现以自动控制系统的典型实例——按预定要求控制工件到指定位置的伺服系统为例来说明控制电机的种类和用途,如图 0-11 所示。这种控制系统常用于数控机床上。

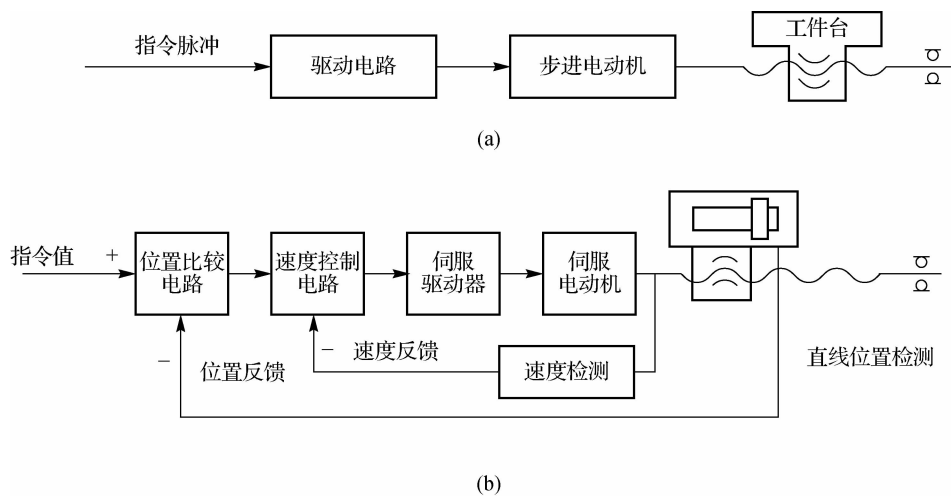


图 0-11 两种伺服系统示意方框图

图 0-11 所示为两种不同伺服系统的示意方框图。其中图 0-11(a)所示为经济型数控机床常用的步进电动机开环伺服系统,计算机数控装置给出位移指令脉冲以及脉冲频率,驱动电路将脉冲放大,去驱动步进电动机按命令脉冲的频率去执行相应的速度,并带动工作台移动至相应位置。由于步进电机存在着失步的可能性,所以这种控制系统的控制精度不够高。

图 0-11(b)所示为高档数控机床使用的全闭环位置伺服控制系统,该系统由数控装置给出加工所要求的位移指令值,在机床工作台上装有直线位置传感器进行实际位置检测,在伺服电动机轴上还装有速度传感器完成实际速度检测。该系统的位置比较电路要进行位置指令值和实际位置反馈值之间的偏差运算,根据偏差情况计算出所需速度,所需速度还要和实

际速度检测值进行比较,用一系列综合运算结果实时地通过伺服驱动器去推动伺服电动机旋转,实现工作台的精确移动。

课堂体验

课堂体验 7:步进电机的运行体验

步进电机接通控制脉冲,观察其旋转的角度。改变控制脉冲的数量,再次观察步进电机的旋转角度。

叙述体验过程及观察到的现象。

 回答:

课堂体验 8:测速发电机的运行体验

接通交流电动机的供电电源(连接测速发电机),测量测速发电机的输出电压。改变交流电动机的转速,再次测量测速发电机的输出电压。

叙述体验过程及观察到的现象。

 回答:

五、电力电子基本知识

我们身边的电力系统采用的基本上是 50 Hz 固定频率的交流电,但它未必是最佳选择,有很多时候,为了高效率利用电能,可以根据需要改变频率或将交流电变成直流电,即进行电能变换。电力电子技术就是使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。电力电子电路通常由 3 部分构成:由电力电子器件构成的主电路、控制及驱动电路、保护电路。

在通用变频器中,主电路由整流电路及逆变电路组成。整流电路一般采用整流模块和整流二极管。逆变电路的电力电子器件的种类较多,在中小功率通用变频器中使用最多的是双极结型晶体管(BJT)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)和智能功率模块(IPM)等,在大中功率通用变频器中使用最多的是门极可关断晶闸管(GTO)、集成门极换流晶闸管(IGCT)和绝缘栅双极晶体管等。在交流电机软起动器中,采用晶闸管进行。如图 0-12 所示为在电力电

子设备中使用的主要电力电子器件的封装实物图,电流大于 200 A(尤其是 500 A 以上)的半导体器件上首选平板型结构。



图 0-12 电力电子器件的外形图

虽然电力电子器件工作在开关状态,但由于它并不是理想开关,所以存在自身损耗。为了保证不因损耗发热而损坏器件,电力电子器件不仅在器件封装上比较讲究,而且工作中一般都安装散热器。自身损耗主要由器件的通态损耗、断态损耗、开通损耗及关断损耗构成。当器件开关频率较高时,开通损耗及关断损耗会随之增大。如图 0-13 所示为与器件配套的散热装置。

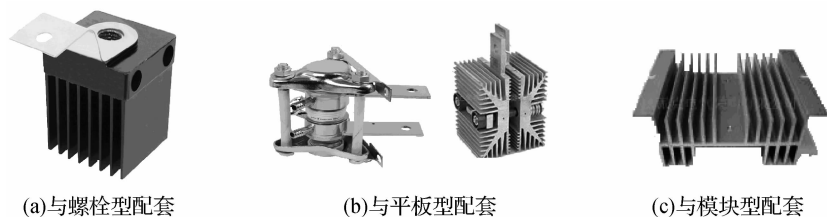


图 0-13 与器件配套的散热装置

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等。驱动电路在电力变换电路中的位置如图 0-14 所示。

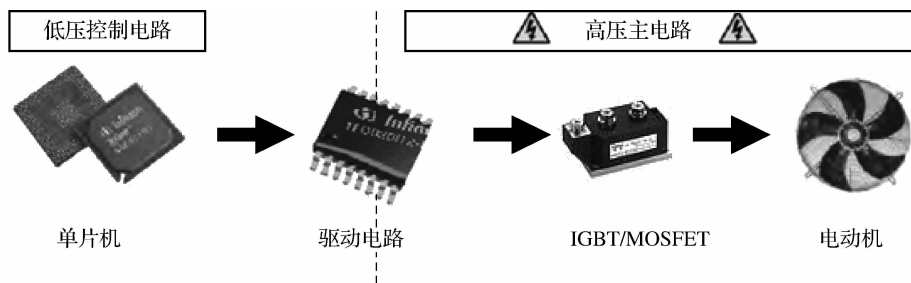


图 0-14 驱动电路在电力变换电路中的位置

电力电子器件在选择时尽管已经考虑了安全余量,但仍避免不了在实际使用中的损坏。所以为了提高运行的可靠性,还要有相应的保护措施。保护措施包括过电压保护、过电流保

护、断态时电压上升率(du/dt)的限制、开通时电流上升率(di/dt)的限制、缓冲电路及过热保护等。

电力电子器件种类繁多,发展迅速,有的在使用中,有的在研制期,如门极可关断(GTO)晶闸管、场控晶闸管(MCT)、电子注入增强栅晶体管(IEGT)等。目前得到广泛使用的还有模块化器件,如智能电力模块(IPM)、电力集成模块(PIM),这些器件各有其特点,请参阅有关材料,在此就不一一赘述。

▶ 课堂体验

课堂体验 9: 普通晶闸管的体验

连接晶闸管整流电路,其负载为台灯。调整晶闸管的导通角,观察台灯的亮度变化。叙述体验过程及观察到的现象。

 回答:

课堂体验 10: IGBT 的极性测量体验

用指针式万用表电阻挡或数字万用表二极管挡测量 IGBT 的极性及好坏。叙述体验过程及观察到的现象。

 回答:

六、变频器及软起动器简介

1. 变频器基本概述

变频技术是将电信号频率按照控制的要求,通过具体的电路实现电信号频率变换的应用型技术。

变频技术是应交流电机无级调速的需要而产生的,它的发展建立在电力电子技术的创新、电力电子器件及材料的开发和制造工艺水平提高的基础之上,尤其是高压大容量绝缘栅双极晶体管、集成门极换流晶闸管的成功开发,使大功率变频技术得以迅速发展且性能日益完善。

变频器是变频技术应用的装置,是运动控制系统中的功率变换器。变频器作为重要的功率变换部件,可为系统提供可控的高性能变压变频交流电源。

1) 变频器发展历程

随着生产技术的不断发展,直流拖动的薄弱环节逐步显现出来。由于换向器的存在,使直流电动机的维护工作量加大,单机容量、最高转速以及使用环境都受到限制。使用者转向结构简单、运行可靠、便于维护、价格低廉的异步电动机,但异步电动机的调速性能难以满足生产要求。于是,从20世纪30年代开始,人们就致力于交流调速技术的研究,然而进展缓慢。在相当长时期内,变速传动领域,直流调速一直以其优良的性能领先于交流调速。60年代以后特别是70年代以来,电力电子技术和控制技术的飞速发展,使得交流调速可以与直流调速相媲美、相竞争。目前,交流调速逐步代替直流调速的时代已经到来。

电力电子器件的发展为交流调速奠定了物质基础。20世纪50年代末出现了晶闸管,由晶闸管构成的静止变频电源输出方波或阶梯波的交变电压,取代旋转变频机组实现了变频调速,然而晶闸管属于半控型器件,可以控制导通,但不能由门极控制关断。因此,由普通晶闸管组成的逆变器用于交流调速必须附加强迫换向电路。70年代后期,以功率晶体管(GTR)、门极可关断晶闸管(GTO)、功率MOS场效应管(PowerMOSFET)为代表的全控型器件先后问世,并迅速发展,通过对这些器件门极(基极、栅极)的控制,既能控制导通又能控制关断,又称自关断器件。它不再需要强迫换向电路,使得逆变器结构简单、紧凑。此外,这些器件的开关速度普遍高于晶闸管,可用于开关速度较高的电路。在80年代后期,以绝缘栅双极型晶体管(IGBT)为代表的复合型器件异军突起。它把MOSFET的驱动功率小、开关速度快的优点和GTR通态压降小、载流能力大的优点集于一身,性能十分优越,与IGBT相对应,MOS控制晶体管(MCT)综合了晶闸管的高电压、大电流特性和MOSFET的快速开关特性,是极有发展前景的大功率、高频功率开关器件。电力电子器件正在向大功率、高频化、智能化发展。80年代以后出现的功率集成电路(PIC),集功率开关器件、驱动电路、保护电路、接口电路于一体,目前已用于交流调速的智能功率模块(IPM)采用IGBT作为功率开关,含有驱动电路及过载、短路、超温、欠电压保护电路,实现了信号处理、故障诊断、自我保护等多种智能功能,既减少了体积、减轻了重量,又提高了可靠性,使用维护都更加方便,是功率器件的发展方向。

目前,作为交-直-交变频技术的矢量控制变频和直接转矩控制,由于它们输入功率因数低,谐波电流大,直流回路需要大的储能电容,再生能量又不能反馈回电网,人们又研制了矩阵式交-交变频技术。该技术虽尚未成熟,但是,矩阵式交-交变频技术具有功率因数为1、输入电流为正弦且能四象限运行、系统的功率密度大的特点。

20世纪90年代后半期,变频技术的发展使家用电器具有高速度、高出力、控制性能好、小型轻量、大容量、长寿命、工作安全可靠、静音和省电等优点,广泛应用于家用电器的控制技术领域,使家用电器的品质和性能产生了历史性的变化。变频太阳能发电技术,将进入人们的日常生活,家用太阳能发电系统将给家电提供新的能源。

现在利用变频技术不但可实现图像清晰度的提高,还可应用在保护视力、提高场频性能等方面。另外,改变清晰度不同等级的图像格式时也用到了变频技术,如变频彩电的出现可以使人们观看到更高质量的图像,同时又保护了观看者的视力。

2) 变频调速的方法和特点

变频调速是通过改变异步电动机定子绕组供电频率 f_1 , 从而改变其同步转速的调速方法。当转差率 s 一定时, 电动机的转速 n 基本上正比于 f_1 。很明显, 只要有输出频率可平滑调节的变频电源, 就能平滑、无极地调节异步电动机的转速。

变频调速系统的主要设备是提供变频电源的变频器。目前国内使用较多的是交-直-交变频技术。

变频器的特点如下。

(1) 变频器结构复杂, 价格昂贵, 容量有限。随着电力电子技术的发展, 其发展趋势将会是简单可靠、性能优异、操作方便。

(2) 变频器具有机械特性较硬、静差率小、转速稳定性好、调速范围广、平滑性高等特点, 可实现无级调速。

(3) 变频调速时, 转差率 s 较小, 则转差功率损耗较小, 效率较高。

(4) 变频调速时, 基频以下调速为恒转矩调速方式, 基频以上调速近似为恒功率调速方式。

2. 变频技术的常见类型

从工作原理上讲, 变频技术就是把工频交流电变成不同频率的交流电, 或是把直流电变成不同频率的交流电, 也可以把交流电变成直流电再逆变成不同频率的交流电等。在这些变化过程中, 往往看重的是电源频率的变化, 而不重视电源其他参数的变化。

下面介绍变频技术的几种常见类型。

(1) 交-直变频技术, 即整流技术。这种变频技术是通过二极管整流和续流或晶闸管、功率晶体管可控整流, 实现交-直变换。这种变换技术多用于工频整流。

(2) 直-直变频技术, 即斩波技术。这种变频技术是通过改变功率半导体器件的通断时间, 即改变功率半导体器件驱动电路触发脉冲的频率, 或通过改变功率半导体器件驱动电路触发脉冲的宽度, 从而实现调节直流平均电压的目的。

(3) 直-交变频技术, 即逆变技术。这种变频技术是振荡器利用电子放大器件将直流电变成不同频率的交流电, 它的关键技术是逆变器, 而逆变器就是利用功率开关进行直流变交流, 并改变频率的变换装置。

(4) 交-直-交变频技术。这种技术采用了多种拓扑结构, 由于其存在着中间低压环节, 所以具有结构复杂、效率低、可靠性差等缺点。但由于其发展较早, 技术也比较成熟, 所以目前仍得到广泛应用。随着中压变频技术的发展, 特别是新型大功率可关断器件的研制成功, 中压变频技术由于没有中间低压环节, 因而在结构上有着广阔的发展前景。

(5) 交-交变频技术, 即移相技术。这种变频技术是通过调整功率半导体器件的导通与关断时间, 即改变功率半导体器件驱动电路触发脉冲的延迟角, 来达到交流无触点开关、调压、调光、调速等目的。交-交变频是早期变频的主要形式, 适用于低转速大容量的电动机负载。由于交-交变频技术的主电路开关器件处于自然关断状态, 不存在强迫换流问题, 所以第一代电力电子器件——晶闸管就能完全满足要求。

3. 变频技术的典型应用

1) 变频技术在自动生产线上的应用

变频器的最初用途是速度控制, 应用变频调速时, 可以大大提高电动机转速的控制精

度,使电动机在最节能的转速下运行,因此,在工业生产中广泛应用。

自动生产线大多具有 Profibus 网络和 BICO 控制功能,通过工业控制计算机和 PLC,利用 Profibus 网络控制及变频器外部端子两种控制方法,对变频器进行自动和手动控制。正常时采用第一命令数据组 CDS 进行 Profibus 网络控制(自动控制);网络有故障时采用第二命令数据组,即变频器外部端子控制(手动控制)。在实际应用中所有变频器都安装了 Profibus 模板、BOP 操作面板。在硬件设置上,开关量输入 1 作为第一命令数据组 CDS 的输入信号;开关量输入 2 作为第二命令数据组的变频器起动、停止信号;开关量输入 3 作为第二命令数据组的变频器电动电位计升高信号;开关量输入 4 作为第二命令数据的变频器电动电位计降低信号。变频器运行的各种状态及现行值均通过网络传送到 PLC,再经过工业控制计算机显示及控制。

2) 变频技术在民用产品中的应用

随着人们生活水平的不断提高,像变频空调、微波炉、冰箱、洗衣机、节能灯等家电已走入普通家庭。例如,中央空调已在宾馆、饭店、工矿、企业、办公楼等处被广泛应用。中央空调的主要设备是风机、水泵。对风机、水泵类负载可采用变频器进行控制,常用的变频器是变转矩变频器,可省电 30%~60%,同时还可延长空调的使用寿命。在控制过程中,使用温湿度传感器和微机闭环控制,使工作场合的温度更稳定。空调电动机一般为 380 V、15~55 kW。变频器可采用三相输入、三相输出或单相输入、三相输出交-交变频电路。变频器除了在工业控制领域得到应用外,在普通家庭中,节约电费、提高家电性能和保护环境等方面也受到人们的关注,变频家电成为变频器的另一个广阔市场和应用趋势。家用空调一般是在轻负载情况下运行的。采用变频器的容量控制,在负载下降时,变频器的频率降低,使压缩机压缩能力下降,以此来保持压缩机压缩能力与负载的平衡。在利用变频器的变频控制使压缩机转速下降时,由于热交换器容量相对于压缩机容量的比率增加,因此,压缩机是高效率运行,特别是轻负载时更为显著。

例如,变频洗衣机利用调速控制技术对电动机、动力传动系统以及控制系统进行变频控制。它在开始工作的短时间内,选用低水位洗涤,衣服在底部浮不起来,在底部单位面积的重量较大,洗涤剂浓度比较高,此时采用低速较好;若此时使用较高转速洗,会对衣服造成损坏。变频洗衣机可实现无级调速,使用理想的程序洗涤衣服。

3) 变频技术在高层供水中的应用

随着城市高层建筑供水问题的日益突出,保持供水压力恒定、提高供水质量、保证供水可靠性和安全性是相当重要的。恒压供水自动控制系统工作时,设备通过安装在供水管网上的高灵敏度压力传感器来检测供水管网在用水量变化时的压力变化,自动调节峰谷用水量,保证供水管网压力恒定,以满足用户用水的需求。同时可以实现在线调整,无水自动停泵,低水压全速运行,变频泵转速、管网压力数码显示,过电流保护及工作电流显示,变频器故障显示,蜂鸣器、电铃报警,供水管网过水压自动停泵并报警,一次水不足自动停泵等。由于变频器的使用,使泵转速下降,出口压力降低,减少了机械磨损,降低了维修的工作量,延长了设备的使用寿命,提高了功率因数,避免了电动机直接工频使用时大电流对电动机线圈和电网的冲击。另外,电动机和泵共同组合为一体,它既是动力源,又是供水调节机构,降低了工人的劳动强度。

4) 变频技术在电梯中的应用

变频器在电梯控制系统中的作用可以分为以下几点。

- (1) 通过调节变频器的调制频率,可以使电梯静音运行。
- (2) S 曲线的设定保证了电梯平滑运行,提高了乘坐舒适感。
- (3) 采用了高性能的矢量控制,轿厢可以快速平稳地运行。
- (4) 变频器的高力矩输出和过载能力保证电梯可靠、无跳闸运行。
- (5) 电梯采用变频器控制,减少了电梯的机械维护量。

5) 变频技术在照明中的应用

在全球经济发展过程中,能源的紧张不仅制约了经济的增长,也给许多发达国家的发展带来了相当大的问题。变频电源的应用使得照明技术、高频逆变技术的应用领域不断扩大。以节能为目的,变频器广泛应用于各行业。在我国实施的“绿色照明工程”中,变频电子节能灯是主要推广项目。

普通的白炽灯光效为 10 lm/W 左右,寿命约为 2 000 h。由于白炽灯工作时的灯丝温度很高,大部分的能量都以红外辐射的形式浪费掉。而节能灯工作时灯丝的温度在 1 160 K 左右,比白炽灯工作的温度(2 200~2 700 K)低很多,所以它的寿命提高到 5 000 h 以上。由于节能灯不存在白炽灯那样的电流热效应,所以荧光粉的能量转换效率也很高,达到 60 lm/W 以上,仅镇流器一项即可省电 20%,再配上稀土三基色高效节能灯,比普通的白炽灯省电 60%~80%,比普通的节能灯省电 25%~50%。

6) 变频技术在风力发电中的应用

电力电子技术在风力发电技术中起到了重要作用,尤其是对于恒定速度、可变速度风力涡轮机和电网的接口技术至关重要。由于风速是不断变化的,因此,基于风力电力系统的电能质量和可靠性只能依据当时的风速来预测,最佳的控制方案需要功率调节才能制定。

变速风力发电机组根据风速变化使机组保持最佳叶尖速比,从而获得最大风能。另外,由于变速风力发电机组与电网实现了柔性连接,大大减少了机械冲击和对电网的冲击。因此,采用变速风力发电机组已成为利用风力发电机组的主流。

到目前为止,变频器已经在工业制造、钢铁、有色冶金、油田、炼油、石化、化工、纺织印染、医药、造纸、卷烟、高层建筑、建材、家用电器、数控技术及机械行业等领域得到广泛的应用,而且随着智能型、环保型变频器的出现,变频器的应用领域正在不断扩大。其主要发展方向有以下几项。

- (1) 实现高水平的自动控制。
- (2) 开发节能变频器。
- (3) 能够使得控制装置小型化。
- (4) 实现高速度的数字控制。
- (5) 能够利用模拟器与计算机辅助设计进行网络现场控制。

4. 软起动器基本概述

1) 软起动器简介

三相鼠笼型异步电动机直接起动(全压起动)虽然起动方法简单、经济,但其起动电流可达额定电流的 4~7 倍。过大的起动电流导致线路产生较大的压降,严重冲击电网,可对电网上其他设备构成严重威胁。国家标准规定,一般情况下直接起动的起动电流在电网中引

起的电压降不超过电网额定电压的 10%(频繁起动)或 15%(不频繁起动)就允许直接起动,还应综合考虑负载和传动机构等因素。例如,对中等容量以上的异步电动机传动系统,直接起动时很大的突跳转矩冲击会使轴承、齿轮磨损加重,甚至损坏,而且减速箱故障率高,同时过大的机械冲击大大降低了机械设备的寿命,很大的冲击电流将导致电机绕组的绝缘老化,电气设计的寿命下降,设备维护率的提高。这些都会对设备产生严重影响。

软起动器是一种用来控制三相鼠笼型异步电动机的新设备,是集电机软起动、软停车、轻载节能和多种保护功能于一体的新型电机控制装置。它的主要构成是串接于电源与被控电机之间的三相反并联晶闸管及其电子控制电路。运用不同的方法,控制三相反并联晶闸管的导通角,使被控电机的输入电压按不同的要求变化,从而可实现不同的功能。基本上,在不需调速的各种应用场合,三相鼠笼型异步电动机都可以使用软起动器。目前的应用范围是交流 380 V(也可为 660 V),电机功率从几千瓦到 800 kW。软起动器特别适用于各种泵类负载或风机类负载,需要软起动与软停车的场合。

2) 软起动器的工作模式

早期的软起动器是以起动电压为控制对象进行软起动的,新型的软起动器一般都采用智能化控制,有多种起动模式供用户选择,以适应各种复杂的应用和负载的变化。这些起动模式有限流起动模式、电压斜坡起动模式、突跳起动模式和电压限流双闭环起动模式等。

限流起动模式一般用于对起动电流有严格限制要求的场合。当电动机起动时,软起动器的输出电压迅速增加,直到定子电流达到设定的限流值,此后将保持定子电流稳定在此限流值上。随着输出电压的逐渐上升,电动机逐渐加速,当电机达到稳定转速时,旁路接触器的主触点闭合,输出电流迅速下降至电动机所带负载对应的稳定电流,起动过程完成。

电压斜坡起动模式适用于对起动电流要求不严格,但对起动过程的平稳性要求较高的拖动中。当电动机起动时,在定子电流不超过额定值的 400% 范围内,软起动器的输出电压迅速上升到一定值,然后输出电压按所设定的输出参数逐渐上升,电动机随着电压的上升而不断平稳加速,当电压达到额定值时,电动机达到额定转速,旁路接触器主触点闭合,起动过程结束。

突跳式起动模式用于重负载场合,起动时针对重负载,先给电动机的定子绕组施加一个较高的固定电压,使其持续一小段时间(如 100 ms),以克服电动机负载的静摩擦力使电动机起动,然后按限流突跳起动方式或按电压斜坡突跳起动方式起动,解决了带重负载起动困难的问题。

3) 软起动器的优势

减压起动方式有 Y- Δ 起动、自耦减压起动、电抗器起动等。这些起动方式都属于有级减压起动,存在明显缺点,即起动过程中出现二次冲击电流。由于传统的减压起动方式技术落后,国家已明令淘汰。所以在工业应用中,额定功率 55~99 kW 及以上的三相鼠笼型异步电动机在经济条件允许的情况下尽量采用软起动器。在这种起动方式中,可以控制其最大的起动电流约为额定电流的 2~4 倍,使定子电流既处在其最大的容许电流范围之内,又可使电动机以最快的速度起动,缩短起动时间。

软起动的优势在于减少起动过程中引起的电网压降,不影响与其共网的其他电气设备的正常运行;减少起动电流,改善电动机局部过热的情况,提高电动机寿命;减小硬起动带来的机械冲击力,减小对减速机构的磨损。

(1)无冲击电流。软起动器在起动电机时,通过逐渐增大晶闸管导通角,使电机起动电流从零线性上升至设定值。对电机无冲击,提高了供电可靠性,平稳起动,减少对负载机械的冲击转矩,延长机器使用寿命。

(2)有软停车功能,即平滑减速,逐渐停机,它可以克服瞬间断电停机的弊病,减轻对重载机械的冲击,避免高层供水系统的水锤效应,减少设备损坏。

(3)起动参数可调,根据负载情况及电网继电保护特性选择,可自由地无级调整至最佳的起动电流。

4)软起动器的典型应用

变频器和软起动器是两种完全不同用途的产品。变频器是用于需要调速的地方,其输出不但改变电压而且改变频率;软起动器实际上是个调压器,用于电机起动时,输出只改变电压并没有改变频率。变频器具备软起动器的所有功能,但它的价格比软起动器贵得多,结构也复杂得多。目前软起动器主要应用在大功率三相鼠笼型异步电动机的起动,特别是使用最为广泛的鼓风机和水泵等,一般情况下这些设备都采用软起动方法。

课堂体验

课堂体验 11:变频器的运行体验

连接变频器供电电源(变频器和三相交流异步电动机已连接)。调整电位器,改变三相交流异步电动机的速度变化。

叙述体验过程及观察到的现象。

 回答:

课堂体验 12:软起动器的运行体验

连接软起动器供电电源(软起动器和三相交流异步电动机已连接)。观察三相交流异步电动机的起动过程,并用示波器观察三相交流异步电动机三相绕组上的电压波形。

叙述体验过程及观察到的现象。

 回答:

问题与思考

问题 1 IGBT 的主要用途是什么? 一般如何使用?

思考并回答:

问题 2 变频器有哪些类型? 主要特点是什么?

思考并回答:

问题 3 软起动器有哪些功能? 起动时主要变化参数是什么?

思考并回答:

小 结

在电机拖动与调速技术中,机电能量转换的媒介是磁场,磁场的路径是磁路。因此,学习磁场、磁路及电磁感应的概念,是学习电机拖动和电机调速的重要基础。

电机的类型很多,包括直流电机、交流电机、变压器、控制电机等。发电机和电动机只不过是电机的两种运行方式,它们本身是可逆的。根据电机的原理,每种控制电机都可以归属于发电机、电动机或变压器这三种电机中的一种。根据电力拖动的需要,我们在学习中重点放在电动机的学习上。

电动机的工作原理是通过一种静止的磁场与以传导方式通入电枢绕组中的电流相互作用而产生一种恒定方向的电磁转矩来实现拖动作用。三相异步电动机的工作原理,就是通过一种旋转磁场与由这种旋转磁场借助于感应作用在转子绕组内所感生的电流相互作用,以产生电磁转矩来实现拖动作用。在三相异步电动机中实现电能转换的前提是产生旋转磁场。

电力电子器件是电力电子技术的核心,是电力电子电路的基础,同时也是变频技术的关键器件。变频技术就是对电能进行变换和控制的技术。



复习思考题

1. 电机的基本原理是什么?
2. 说出几种常用的电力电子器件。
3. 简述电机的概念和分类。
4. 变压器分成哪几类? 主要用在哪些方面?
5. 叙述各种电动机的应用及特点。
6. 比较控制电机与普通电机的异同点,简述控制电机在实际中的应用。
7. 什么是变频调速技术? 什么是变频器?
8. 变频调速技术的发展趋势是什么?
9. 简述变频器在实际中的应用。
10. 比较变频器与软起动器的异同。