

# 单元一

## 直流电机



### 知识目标

- 掌握直流电机的运行原理；
- 掌握直流电动机的机械特性；
- 熟悉直流电动机的两种启动方式；
- 掌握直流电动机的制动方法和调速方法。



### 技能目标

- 能正确计算电机运行时电枢产生的感应电动势和总电磁转矩；
- 能根据指点电动机的基本平衡方程式得出直流电动机的工作特性。



### 单元导读

直流电机可分为直流发电机和直流电动机两大类。直流发电机将机械能转换为电能，而直流电动机将电能转换为机械能。

由于直流电动机具有较好的调速性能、较大的启动转矩和过载能力，故广泛应用在启动和调速要求较高的生产机械中，如轧钢机、起重机、造纸及纺织行业的生产机械等。



### 相关知识

## 学习情境一 直流电机概述

### 一、直流电机的结构

直流电机主要由静止部分和旋转部分构成，在静止部分和旋转部分之间要有一定的气隙，其中静止部分称为定子，旋转部分称为转子。如图 1-1 所示为直流电机的结构。

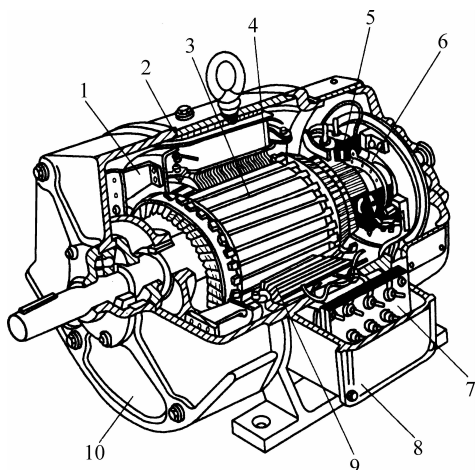


图 1-1 直流电机的结构

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—接线盒；9—换向极；10—端盖

## 1. 定子部分

直流电机的定子部分主要由主磁极、换向极、机座和电刷装置组成。

### 1) 主磁极

主磁极一般由主磁极铁芯和主磁极绕组(励磁绕组)组成,其作用是在定子和转子之间的气隙中建立主磁场,使电枢绕组在此磁场的作用下产生感应电动势和电磁转矩。主磁极铁芯柱体称为极身,靠近气隙一端较宽的部分称为极靴,极靴的主要作用是使气隙磁通密度分布均匀,并与极身一起支撑励磁绕组。为了尽可能地减小涡流损耗和磁滞损耗,主磁极铁芯一般由 $1\sim 1.5\text{ mm}$ 厚的低碳钢板叠压而成,整个磁极用螺钉固定在机座上,如图 1-2 所示。

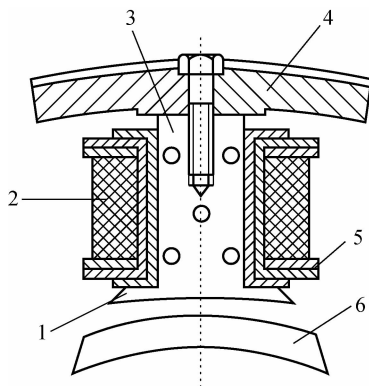


图 1-2 直流电机主磁极的结构

1—极靴；2—励磁绕组；3—极身；4—机座；5—框架；6—转子

### 2) 换向极

换向极主要由铁芯和绕组组成,装在电机两主磁极之间的几何中心线上,又称为附加极,其主要作用是改善电机的换向性能。



### 3) 机座

机座通常由铸钢和厚钢板焊接而成,其主要作用有两个:一是作为电机磁路的一部分;二是用来固定主磁极、换向极及端盖等部件,起机械支承的作用。

### 4) 电刷装置

电刷装置是直流电机重要的组成部分,其作用是将旋转的电枢绕组与固定不动的外电路相连接,引入或引出直流电压和直流电流,并与换向器相配合,起整流的作用。

## 2. 转子部分

直流电机的转子主要由电枢铁芯、电枢绕组和换向器组成,如图 1-3 所示。

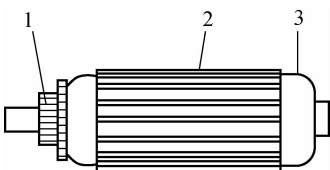


图 1-3 直流电机的转子

1—换向器; 2—电枢铁芯; 3—电枢绕组

### 1) 电枢铁芯

电枢铁芯是电机主磁路的一部分,主要用来嵌放电枢绕组。由于电机运行时电枢与气隙磁场间的相对运动将引起磁滞及涡流损耗,因此,为了减小损耗,电枢铁芯通常用两面涂有厚度为 0.5 mm 的绝缘漆的硅钢片叠压而成,并固定在转子支架或转轴上。

### 2) 电枢绕组

电枢绕组是直流电机的主要电路部分,由许多按一定规律连接的绝缘线圈(导线)组成。其主要作用是产生感应电动势和电磁转矩,是实现机械能与电能互相转换的重要部件。

在电机中每一个线圈为一个元件。根据连接规律的不同,电枢绕组可分为单叠绕组、复叠绕组、单波绕组和复波绕组等,电机中常见的绕组连接方式有单叠绕组和单波绕组。

(1) 单叠绕组。单叠绕组的特点是元件的首尾两端分别接到相邻的两个换向片上,并且前一个元件的尾端与后一个元件的首端接在同一个换向片上,如图 1-4 所示。

在图 1-4 中,元件的上层边(首端)用实线表示,元件的下层边(尾端)用虚线表示,元件两条边的间距称为第一节距,用  $y_1$  表示;连接在同一个换向片上的两个元件中,第一个元件的下层边与第二个元件的上层边之间的距离称为第二节距,用  $y_2$  表示;一个元件的首尾两端所连接的两个换向片之间的距离称为换向节距,用  $y_k$  表示;连接在同一个换向片上的两个元件对应边之间的距离(即第一个元件的上层边与第二个元件的上层边之间的距离)称为合成节距,用  $y$  表示。通常,单叠绕组的换向节距为 1。

极间距是一个磁极在电枢表面的空间距离,用  $\tau$  表示。一般用电枢槽数  $z$  计算极间距,即

$$\tau = \frac{z}{2p}$$

式中, $z$  为电枢槽数; $p$  为极对数。

(2) 单波绕组。单波绕组的特点是把磁场中位置差不多对应的元件连接起来,元件所连接的换向片相隔较远,如图 1-5 所示。

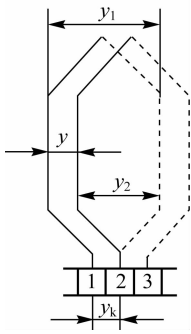


图 1-4 单叠绕组

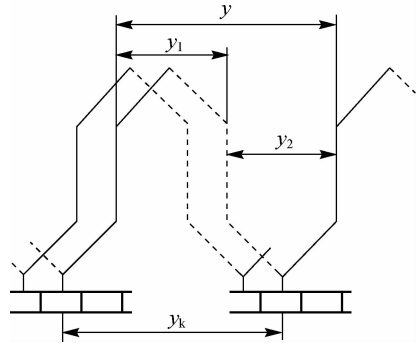


图 1-5 单波绕组

### 3)换向器

换向器是由许多燕尾形状的铜质换向片与片间云母片组成圆筒形状套在钢套筒上,最后用螺母压紧构成的。其主要作用是与电刷一起将直流电动机输入的直流电流转换为电枢绕组内的交变电流,或将直流发电机电枢绕组中的交变电动势转换为直流电动势,向外电路输出直流电。

## 二、直流电机的基本原理

### 1. 直流发电机

直流发电机是基于电磁感应定律工作的,即在磁感应强度为  $B$  的磁场中,若导体做切割磁感线运动,则在导体内部产生感应电动势,若  $B$ 、 $l$ 、 $v$  三者相互垂直,则感应电动势  $e$  的大小为

$$e = Blv \tag{1-1}$$

式中,  $B$  为磁感应强度(T);  $l$  为导体长度(m);  $v$  为导体切割磁感线的速度(m/s);  $e$  的方向由右手定则确定。

如图 1-6 所示为直流发电机的工作原理示意图。当线圈按逆时针方向运动时,线圈  $ab$  边在 N 极范围内,产生的感应电动势从  $b$  到  $a$ ;线圈  $cd$  边在 S 极范围内,产生的感应电动势方向是从  $d$  到  $c$ 。从整个线圈来看,感应电动势的方向是  $d-c-b-a$ 。因此,与线圈  $a$  端连接的电刷 A 处于正电位,而与线圈  $d$  端连接的电刷 B 处于负电位。

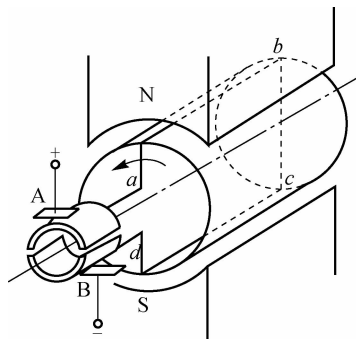


图 1-6 直流发电机的工作原理

当线圈  $ab$  边转到 S 极范围内时,  $cd$  边就转到 N 极范围内。此时用右手定则判断可知,

线圈  $cd$  边所产生的感应电动势方向是从  $c$  到  $d$ , 线圈  $ab$  边所产生的感应电动势方向是从  $a$  到  $b$ 。由于电刷固定不动, 因此, 与线圈  $d$  端连接的电刷 A 的电位仍为正, 与线圈  $a$  端连接的电刷 B 的电位仍为负。

由此可知, 当线圈不停地旋转时, 电刷 A 始终是正电位, 电刷 B 始终是负电位。因此, 由两电刷引出的是具有恒定方向的电动势, 负载上得到的是具有恒定方向的电压和电流。

## 2. 直流电动机

直流电动机的工作原理是基于电磁力定律, 即载流导体在磁场中会受到电磁力的作用, 当磁感线与导体的方向相互垂直时, 作用在载流导体上的电磁力  $F$  的大小为

$$F = BIl \quad (1-2)$$

式中,  $I$  为载流导体中流过的电流(A);  $F$  的方向由左手定则确定。

如果直流电动机的转子不用原动机拖动, 而把它的电刷 A、B 接在电压为  $U$  的直流电源上, 此时, 线圈中将有电流通过, 如图 1-7 所示。

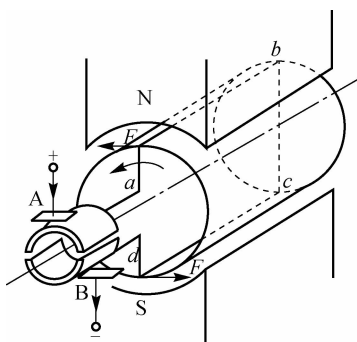


图 1-7 直流电动机的工作原理

从图 1-7 中可以看出, 电刷 A 是正电位, B 是负电位。在 N 极范围内, 线圈  $ab$  中的电流是从  $a$  流向  $b$ ; 在 S 极范围内, 线圈  $cd$  中的电流是从  $c$  流向  $d$ 。根据电磁力定律, 线圈  $ab$  边受到向左的电磁力, 而  $cd$  边受到向右的电磁力。由于磁场是均匀的, 而且导体中流过的电流也相同, 因此, 线圈  $ab$  边和  $cd$  边所受电磁力的大小相等, 方向相反, 线圈按逆时针方向转动。

当线圈转过  $180^\circ$  之后, 线圈  $ab$  与  $cd$  的位置调换了, 但由于电刷的作用, 电磁力的方向仍然不变, 线圈仍然按逆时针方向转动。从而, 线圈按照一定方向不停地旋转, 通过齿轮或皮带等机构拖动负载工作。

## 3. 直流电机的可逆性原理

由前面的分析可知, 一台直流电机理论上既可以作为电动机运行, 也可以作为发电机运行, 只是前提条件不同。当直流电机的电刷 A、B 接在电压为  $U$  的直流电源上时, 电机运行在电动机状态, 线圈按一定方向不停地旋转, 通过齿轮或皮带等机构拖动负载工作, 把电能转换为机械能; 当用原动机拖动直流电机的电枢时, 电机运行在发电机状态, 两电刷引出的是具有恒定方向的电动势, 负载上得到的是具有恒定方向的电压和电流, 从而把机械能转换为电能。

在电机理论中, 一台电机既能做电动机运行又能做发电机运行的原理称为可逆性原理。

#### 4. 励磁方式

励磁方式是指直流电机的励磁线圈与其电枢线圈的连接方式。根据不同的连接方式,常见的直流电机的励磁方式有他励、并励、复励和串励等,如图 1-8 所示。

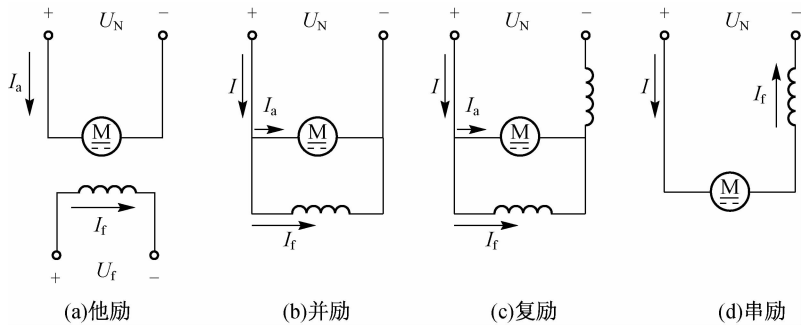


图 1-8 直流电机的励磁方式

### 三、直流电机的铭牌数据

每台直流电机机座的外表面上都有一块铭牌,上面标注着电机的型号和额定值,其中,额定值主要包括额定电压、额定电流、额定功率、额定转速、额定励磁电流等。

#### 1. 型号

直流电机的型号一般由大写的汉语拼音字母和阿拉伯数字组成。以  $Z_2-72$  为例说明, $Z$  表示一般用途的中小型电机,下标 2 表示第二次更新设计,数字 7 表示机座号,2 表示电枢铁芯长度代号。

#### 2. 额定电压

额定电压  $U_N$  是指额定状态下电枢输出端的电压,对于电动机来说,指的是输入的额定电压;对于发电机来说,指的是输出的额定电压,单位为 V。

#### 3. 额定电流

额定电流  $I_N$  是指电机在额定电压、额定功率下运行时,电枢电流的值,单位为 A。

#### 4. 额定功率

额定功率  $P_N$  是指电机在铭牌规定的额定状态下运行时的输出功率,单位为 W 或 kW。对于直流发电机,额定功率  $P_N$  是指输出的电功率,它等于额定电压和额定电流的乘积,即

$$P_N = U_N I_N$$

对于直流电动机,额定功率  $P_N$  是指输出的机械功率,因此,有额定效率  $\eta_N$  存在,即

$$P_N = U_N I_N \eta_N$$

#### 5. 额定转速

额定转速  $n_N$  是指电机在额定状态下运行时转子的转速,单位为 r/min。

#### 6. 额定励磁电流

额定励磁电流  $I_N$  是指电机在额定状态运行时的励磁电流值,单位为 A。



**例 1-1** 已知某直流电动机铭牌数据中的额定功率  $P_N=75 \text{ kW}$ , 额定电压  $U_N=220 \text{ V}$ , 额定转速  $n_N=1\,500 \text{ r/min}$ , 额定效率  $\eta_N=88.5\%$ , 试求该电动机的额定电流。

**解** 对于直流电动机, 有

$$P_N = U_N I_N \eta_N$$

所以该电动机的额定电流为

$$I_N = \frac{P_N}{U_N \eta_N} = \frac{75\,000}{220 \times 88.5\%} \text{ A} = 385 \text{ A}$$

## 学习情境二 直流电机的电枢电动势和电磁转矩

### 一、直流电机的电枢电动势

电枢旋转时, 主磁场在电枢绕组中产生的感应电动势称为电枢电动势。它是指直流电机电枢绕组上正、负电刷间产生的感应电动势。当元件数目较多时, 任何瞬时构成的支路情况是相同的, 且每个导体都分布在具有相同极性的磁极下, 故可先求出每个导体感应电动势的平均值, 再乘以电枢导体总数即为电枢电动势。

由电磁感应定律知, 每个导体中的感应电动势  $e_p$  为

$$e_p = B_p l v \quad (1-3)$$

式中,  $B_p$  为平均气隙磁通密度(T)。

每极磁通的表达式为

$$\Phi = B_p l \tau \quad (1-4)$$

式中,  $\Phi$  为磁通(Wb);  $\tau$  为极间距(mm)。

线速度  $v$  的表达式为

$$v = 2p\tau \frac{n}{60} \quad (1-5)$$

式中,  $p$  为极对数;  $n$  为电枢转速(r/min)。

将式(1-4)和式(1-5)代入式(1-3)得

$$e_p = 2p\Phi \frac{n}{60} \quad (1-6)$$

由上面的分析可知, 电枢电动势的表达式为

$$E_a = \frac{N}{2a} e_p = \frac{pN}{60a} \Phi n = C_e \Phi n \quad (1-7)$$

式中,  $a$  为电枢绕组并联支路对数;  $N$  为电枢导体总数;  $C_e$  为电动势常数,  $C_e = pN/60a$ 。

式(1-7)表明, 直流电机的电枢电动势  $E_a$  的大小与磁通  $\Phi$  和转速  $n$  的乘积成正比, 通过改变磁通或转速可以改变电枢电动势的大小。

### 二、直流电机的电磁转矩

电枢电流与气隙磁场相互作用产生电磁力, 而电磁转矩是由电磁力产生的。由于电枢绕组中各元件产生的电磁转矩同向, 因此, 可以先求出每个导体的平均电磁力及电磁转矩,

然后再乘以电枢导体总数即为总电磁转矩。

每个导体在磁场中所受电磁力的大小为

$$F_p = B_p l \frac{I_a}{2a} \quad (1-8)$$

式中,  $I_a$  为电枢电流(A)。

每个导体的电磁转矩为

$$T_p = F_p \frac{D}{2} \quad (1-9)$$

式中,  $D$  为电枢铁芯直径(mm),  $D=2p\tau/\pi$ 。

将式(1-9)左右两端同时乘以电枢导体总数  $N$  可得总电磁转矩, 即

$$T_{em} = NF_p \frac{D}{2} = NB_p l \frac{I_a}{2a} \frac{D}{2} = \frac{NB_p l I_a D}{4a} \quad (1-10)$$

将  $D=2p\tau/\pi$  和式(1-4)代入式(1-10)得

$$T_{em} = N \frac{\Phi}{\tau} \frac{I_a}{4a} \frac{2p\tau}{\pi} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = C_T \Phi I_a \quad (1-11)$$

式中,  $C_T$  为转矩常数,  $C_T = pN/2\pi a$ 。

通常, 总电磁转矩  $T_{em}$  与磁通  $\Phi$ 、电枢电流  $I_a$  成正比。电动势常数  $C_e$  与转矩常数  $C_T$  之间的关系为

$$C_T = 9.55C_e \quad (1-12)$$

**例 1-2** 已知某台直流发电机  $2p=4$ , 电枢绕组为单叠绕组( $a=2$ ), 电枢导体总数为 372, 额定转速  $n_N=1\,450$  r/min, 每极磁通  $\Phi=6.4 \times 10^{-3}$  Wb。试求:

(1) 电枢绕组的感应电动势。

(2) 当作为电动机使用时, 若电枢电流  $I_a=800$  A, 则总电磁转矩为多少?

解 (1) 
$$C_e = \frac{pN}{60a} = \frac{2 \times 372}{60 \times 2} = 6.2$$

$$E_a = C_e \Phi n = 6.2 \times 6.4 \times 10^{-3} \times 1\,450 \text{ V} = 57.5 \text{ V}$$

(2) 
$$C_T = 9.55C_e = 9.55 \times 6.2 = 59.2$$

$$T_{em} = C_T \Phi I_a = 59.2 \times 6.4 \times 10^{-3} \times 800 \text{ N} \cdot \text{m} = 303.1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

### 学习情境三 直流电机的运行原理

由直流电机的可逆性原理可知, 直流电机既可运行于电动机状态, 也可运行于发电机状态, 现就直流电动机的基本平衡方程和工作特性进行分析。

#### 一、直流电动机的基本平衡方程式

直流电动机在进行机电能量转换时, 必须要有能反映其内部电磁转换过程和内外的机电能量转换过程的方程式, 即基本平衡方程式。基本平衡方程式主要有电动势平衡方程式、转矩平衡方程式、功率平衡方程式。在写基本平衡方程式前应定好各参量的方向, 通常可以





任意规定。一旦定好后所有的方程式都应按参考方向列式,一般按如图 1-9 所示的参考方向规定,各参量的方向与规定的参考方向一致时为正,反之为负。

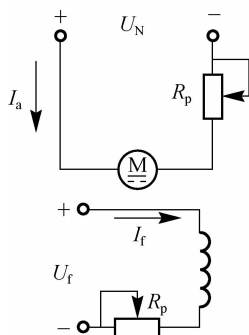


图 1-9 电动机参考方向的规定

### 1. 电动势平衡方程式

由基尔霍夫定律可知电枢回路的电动势平衡方程为

$$U = E_a + I_a R_a \quad (1-13)$$

式中,  $U$  为电枢两端的电压(V);  $R_a$  为电枢电阻( $\Omega$ )。

### 2. 功率平衡方程式

将式(1-13)两边同时乘以电枢电流  $I_a$ , 得电源输入功率为

$$P_1 = P_{em} + P_{Cu} \quad (1-14)$$

式中,  $P_1$  为电源输入功率(W),  $P_1 = UI_a$ ;  $P_{em}$  为电磁功率(W),  $P_{em} = E_a I_a$ ;  $P_{Cu}$  为电枢回路绕组电阻及电刷与换向器表面接触电阻上的损耗(W), 称为铜损耗,  $P_{Cu} = R_a I_a^2$ 。

通常, 电磁功率  $P_{em}$  可表示为

$$P_{em} = P_2 + P_0 \quad (1-15)$$

式中,  $P_2$  为直流电动机输出机械功率(W);  $P_0$  为空载损耗(W)。

空载损耗  $P_0$  可表示为

$$P_0 = P_m + P_{Fe} + P_{add} \quad (1-16)$$

式中,  $P_m$  为机械摩擦损耗(W);  $P_{Fe}$  为铁损耗(W);  $P_{add}$  为附加损耗(W)。

由式(1-14)、式(1-15)和式(1-16)可得

$$P_1 = P_{em} + P_{Cu} = P_2 + P_{Cu} + P_m + P_{Fe} + P_{add} = P_2 + \sum P \quad (1-17)$$

式中,  $\sum P$  为总损耗(W),  $\sum P = P_{Cu} + P_m + P_{Fe} + P_{add}$ 。

由此可得直流电动机的效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} \times 100\% \quad (1-18)$$

### 3. 转矩平衡方程式

将式(1-15)两边同时除以角速度  $\omega$ , 得转矩平衡方程为

$$T_{em} = T_2 + T_0 \quad (1-19)$$

式中,  $T_{em}$  为电磁转矩(N·m),  $T_{em} = P_{em}/\omega$ ;  $T_2$  为电动机的输出机械转矩(N·m),  $T_2 = P_2/\omega$ ;  $T_0$  为空载转矩(N·m),  $T_0 = P_0/\omega$ 。

## 二、他励直流电动机的工作特性

他励直流电动机的工作特性是指电压  $U=U_N=$  常数、电枢回路不串入附加电阻、励磁电流  $I_f=I_{fN}=$  常数时,电动机的转速  $n$ 、电磁转矩  $T_{em}$  和效率  $\eta$  三者与输出功率  $P_2$  之间的关系,用曲线  $n=f(P_2)$ 、 $T_{em}=f(P_2)$ 、 $\eta=f(P_2)$  表示。实际运行中,由于电枢电流  $I_a$  比较容易测量,且  $I_a$  与  $P_2$  成正比改变,因此,一般用曲线  $n=f(I_a)$ 、 $T_{em}=f(I_a)$ 、 $\eta=f(I_a)$  来表示他励直流电动机的工作特性。

### 1. 转速特性

他励直流电动机的转速特性是指电动机运行在额定电压  $U_N$  和额定励磁电流  $I_{fN}$  状态时,转速与电枢电流之间的关系,用曲线  $n=f(I_a)$  表示,如图 1-10 中曲线 1 所示。

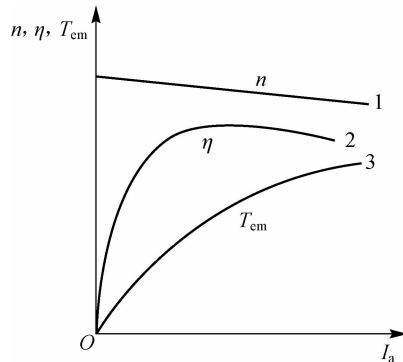


图 1-10 他励电动机的工作特性

由  $U=E_a+I_aR_a$  和  $E_a=C_e\Phi n$  得转速公式

$$n = \frac{U}{C_e\Phi} - \frac{R_a}{C_e\Phi}I_a = \frac{U_N}{C_e\Phi} - \frac{R_a}{C_e\Phi}I_a \quad (1-20)$$

当负载增大时,电动机输出的机械功率  $P_2$  增大,输入功率  $P_1$  也随之增大。因为端电压不变,电枢电流  $I_a$  增大,转速  $n$  减小,所以转速特性曲线是一条略微向下倾斜的直线。

### 2. 转矩特性

他励直流电动机的转矩特性是指电动机运行在额定电压  $U_N$  和额定励磁电流  $I_{fN}$  状态时,电磁转矩与电枢电流之间的关系,用曲线  $T_{em}=f(I_a)$  表示,如图 1-10 中曲线 3 所示。

由式(1-11)可知,当磁通  $\Phi$  恒定时,电磁转矩与电枢电流成正比。由于电磁转矩上升的速度比电流要慢一些,因此,随着电磁转矩的增大,转矩特性曲线为一条斜率逐渐下降的曲线。

### 3. 效率特性

他励直流电动机的效率特性是指电动机运行在额定电压  $U_N$  和额定励磁电流  $I_{fN}$  状态时,效率与电枢电流的关系,用曲线  $\eta=f(I_a)$  表示,如图 1-10 中曲线 2 所示。

由基本平衡方程式分析知

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_{em} - P_0}{P_1} \times 100\% = \frac{E_a I_a - P_0}{U_N I_a} \times 100\% \\ &= \frac{U_N I_a - R_a I_a^2 - P_0}{U_N I_a} \times 100\% = 1 - \frac{R_a I_a^2 + P_0}{U_N I_a} \times 100\% \end{aligned}$$

当直流电动机的电枢电流  $I_a$  增大时,效率很快上升,但是当电枢电流  $I_a$  增大到一定值时,电枢绕组的铜损耗随着电枢电流  $I_a$  的增大快速增加,从而导致效率下降。故他励直流电动机的效率特性曲线是一条先上升后下降的曲线。

## 学习情境四 他励直流电动机的机械特性

### 一、他励直流电动机机械特性的表达式

他励直流电动机的机械特性是指电动机在稳定运行情况下,转速  $n$  与电磁转矩  $T_{em}$  之间的关系,用曲线  $n=f(T_{em})$  表示,如图 1-11 所示。它是电动机机械性能的主要表现,是分析电动机的启动、调速和制动等问题的重要工具。

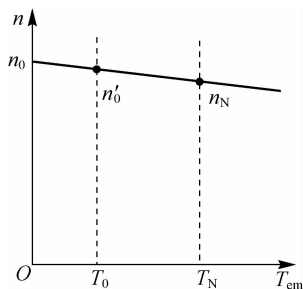


图 1-11 他励直流电动机的机械特性

把式(1-7)和式(1-11)代入式(1-13),得到他励直流电动机的机械特性公式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e \Phi} I_a = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T_{em} = n_0 - \beta T_{em} = n_0 - \Delta n \quad (1-21)$$

式中, $R$  为电枢回路总电阻, $R=R_a+R_s$ , $R_s$  为电枢回路串联电阻, $R_a$  为电枢电阻; $n_0$  为电磁转矩  $T_{em}=0$  时的转速,称为理想空载转速,在实际情况下,由于电动机的理想空载转矩与电磁转矩都不等于零,因此,实际空载转速略小于理想空载转速, $n_0=U/C_e \Phi$ ; $\beta$  为机械特性曲线斜率, $\beta=R/C_e C_T \Phi^2$ ; $\Delta n$  为转速降, $\Delta n=\beta T_{em}$ 。

由式  $\Delta n=\beta T_{em}$  可知,转速降  $\Delta n$  与机械特性曲线斜率  $\beta$  成正比。当电动机的电磁转矩由零逐渐增大时,转速从  $n_0$  开始逐渐下降,其下降的数值即为转速降  $\Delta n$ 。通常把  $\beta$  较大时的机械特性称为软机械特性, $\beta$  较小时的机械特性称为硬机械特性。

### 二、他励直流电动机的固有机械特性

他励直流电动机的固有机械特性是指当电动机电源电压和磁通为额定值,且电枢回路不串联电阻的机械特性,其表达式为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T_{em} \quad (1-22)$$

因为他励直流电动机的机械特性曲线为一条向下倾斜的直线,且斜率  $\beta$  较小,所以它的固有机械特性是硬机械特性,如图 1-12 所示中曲线 1。

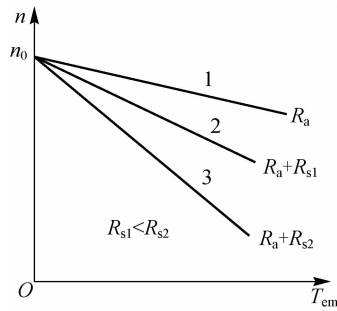


图 1-12 固有机械特性和电枢回路串联电阻的人为机械特性

当电动机刚启动时,转速  $n=0$ ,感应电动势  $E_a=C_e\Phi n=0$ ,此时电枢电流  $I_a$  即为启动电流。由于电枢电阻  $R_a$  较小,在额定电压下启动电流远远超过电动机的最大允许电流,这样会烧毁电动机,因此,直流电动机一般不能直接启动。

### 三、他励直流电动机的人为机械特性

通过人为地改变式(1-21)中的磁通、电源电压和电枢回路串联电阻等参数得到的机械特性称为人为机械特性。常见的人为机械特性有电枢回路串联电阻的人为机械特性、降低电源电压的人为机械特性和减弱励磁磁通的人为机械特性。

#### 1. 电枢回路串联电阻的人为机械特性

当保证电动机电源电压  $U$  和磁通  $\Phi$  为额定值不变时,电枢回路串联电阻时的人为机械特性为

$$n = \frac{U_N}{C_e\Phi_N} - \frac{R_a + R_s}{C_e C_T \Phi_N^2} T_{em} \quad (1-23)$$

与固有机械特性相比,电枢回路串联电阻时的人为机械特性的特点为:理想空载转速  $n_0=U_N/C_e\Phi$  与固有机械特性一样,即改变电阻  $R_s$  时,  $n_0$  不变;机械特性曲线斜率  $\beta$  会随电枢回路串联电阻  $R_s$  的增大而增大,机械特性随之变软。因此,改变  $R_s$  的大小可以得到一组通过理想空载点但斜率不同的放射形直线,见图1-12中曲线2和曲线3。

#### 2. 降低电源电压的人为机械特性

当保证电枢回路不串联电阻且磁通  $\Phi$  为额定值不变时,改变电源电压的人为机械特性为

$$n = \frac{U}{C_e\Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T_{em} \quad (1-24)$$

由于电动机工作电压不能超过其额定电压,因此,电压只能从额定值  $U_N$  向下调节。降低电源电压时的人为机械特性的特点为:理想空载转速  $n_0$  与电源电压成正比,且电源电压为负时,转速  $n_0$  反向。由于机械特性曲线斜率  $\beta$  不变,因此,其机械特性曲线是一组平行线,如图1-13所示。

#### 3. 减弱励磁磁通的人为机械特性

当保证电枢回路不串联电阻且电源电压  $U$  为额定值不变时,减弱磁通  $\Phi$  时的人为机械特性为

$$n = \frac{U_N}{C_e\Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_{em} \quad (1-25)$$

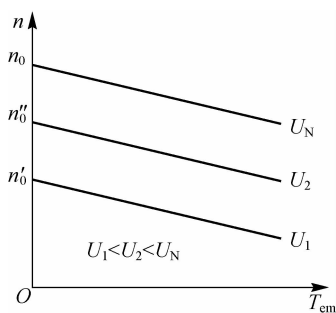


图 1-13 他励直流电动机降低电源电压的人为机械特性

一般情况下,由于磁通  $\Phi$  接近额定值时,磁路已接近饱和值,因此,磁通一般从额定值开始向下调节,具体方法为增大励磁回路串联的可变电阻。减弱磁通  $\Phi$  的人为机械特性的特点为理想空载转速与磁通成反比,减弱磁通  $\Phi$ ,转速  $n_0$  升高;机械特性曲线斜率  $\beta$  与磁通的平方成反比,磁通  $\Phi$  减小,斜率  $\beta$  增大。其机械特性如图 1-14 所示。

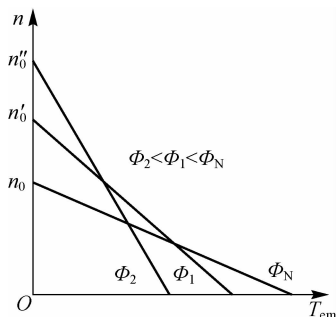


图 1-14 他励直流电动机减弱励磁磁通的人为机械特性

#### 四、他励直流电动机机械特性的求取

##### 1. 固有机机械特性的求取

他励直流电动机的固有机机械特性曲线是一条直线,因此,只要确定两点便可画出其特性曲线。为了计算方便一般取其理想空载点  $(0, n_0)$  和额定运行点  $(T_N, n_N)$ 。

对于理想空载点,  $n_0 = U_N / C_e \Phi_N$ , 其中  $C_e \Phi_N$  可由式  $C_e \Phi_N = (U_N - I_N R_a) / n_N$  计算出来。通常电枢电阻  $R_a$  的数值在铭牌或产品说明中是找不到的,一般用下式估算

$$R_a = \left( \frac{1}{2} \sim \frac{2}{3} \right) \frac{U_N I_N - P_N}{I_N^2} \tag{1-26}$$

将估算的  $R_a$  代入  $C_e \Phi_N = (U_N - I_N R_a) / n_N$ , 从而得到理想空载点。额定运行点可由  $T_N = C_T \Phi_N I_N$  计算得到,其中  $C_T \Phi_N = 9.55 C_e \Phi_N$ 。

然后连接上面求出的两点即可得到固有机机械特性曲线。

##### 2. 人为机械特性的求取

人为机械特性曲线也可用两点连线的方法求出,一般求出  $R_a$ 、 $C_e \Phi_N$  和  $C_T \Phi_N$ , 接着再计算某一负载点  $(T_N, n)$  后便可求得人为机械特性曲线。

**例 1-3** 已知某台他励直流电动机铭牌数据中的  $P_N = 10 \text{ kW}$ ,  $U_N = 220 \text{ V}$ ,  $n_N = 1\,000 \text{ r/min}$ ,

$I_N=53.7\text{ A}$ ,计算其固有机械特性。

解 (1)计算电枢电阻  $R_a$

$$R_a = \frac{2U_N I_N - P_N}{3I_N^2} = \frac{2}{3} \times \frac{220 \times 53.7 - 10\,000}{53.7^2} \Omega = 0.419 \Omega$$

(2)计算  $C_e \Phi_N$

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 53.7 \times 0.419}{1\,000} = 0.197$$

(3)计算理想空载点

$$n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} = \frac{220}{0.197} \text{ r/min} = 1\,116.751 \text{ r/min}$$

(4)计算额定工作点

$$T_N = 9.55 C_e \Phi_N I_N = 9.55 \times 0.197 \times 53.7 \text{ N} \cdot \text{m} = 101.028 \text{ N} \cdot \text{m}$$

## 五、电力拖动系统稳定运行的条件

电力拖动系统的稳定运行是指电力拖动系统在某种外界因素干扰时,系统的运行脱离平衡状态,当外界干扰因素消失后,系统能恢复到原来的平衡状态,或在新的条件下达到新的平衡状态的能力。电动机在电力拖动系统中运行时,一般有稳定运行和不稳定运行两种情况,如图 1-15 所示。

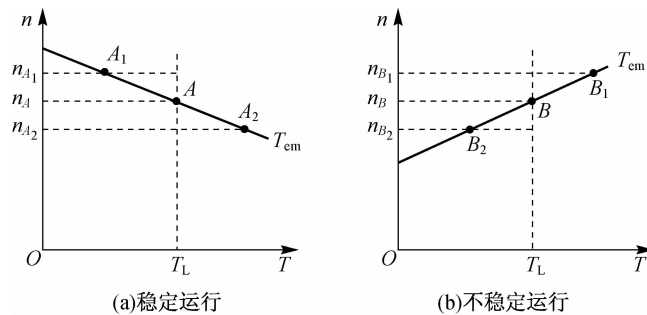


图 1-15 电力拖动系统的运行

一般把负载转矩特性和电动机的机械特性结合起来分析电力拖动系统的稳定性。

图 1-15 (a)中,假设当系统运行于负载转矩特性与电动机的机械特性的交点  $A$  时,出现了某种干扰因素(如电网电压的波动、负载转矩的微小变化等),使电动机转速发生微小的增加,转速由  $n_A$  上升到  $n_{A_1}$ ,系统运行于  $A_1$  点;当干扰消失后,由于  $A_1$  点负载转矩  $T_L$  大于电磁转矩  $T_{em}$ ,因此,迫使系统减速回到  $A$  点。若干扰使电动机转速发生微小的降低,转速由  $n_A$  下降到  $n_{A_2}$ ,系统运行于  $A_2$  点;当干扰消失后,由于  $A_2$  点负载转矩  $T_L$  小于电磁转矩  $T_{em}$ ,因此,迫使系统加速回到  $A$  点。由此可见, $A$  点是稳定运行点。

图 1-15 (b)中,假设当系统运行于负载转矩特性与机械特性的交点  $B$  时,出现了某种干扰因素(如电网电压的波动、负载转矩的微小变化等),使电动机转速发生微小的增加,转速由  $n_B$  上升到  $n_{B_1}$ ,系统运行于  $B_1$  点;当干扰消失后,由于  $B_1$  点负载转矩  $T_L$  小于电磁转矩  $T_{em}$ ,因此,系统将加速运行,不能回到  $B$  点。若干扰使电动机转速发生微小的降低,转速由  $n_B$  下降到  $n_{B_2}$ ,系统运行于  $B_2$  点;当干扰消失后,由于  $B_2$  点负载转矩  $T_L$  大于电磁转矩  $T_{em}$ ,因此,系统将减速运行,不能回到  $B$  点。由此可见, $B$  点不是稳定运行点。

综上所述,电力拖动系统稳定运行的条件有:

(1)必要条件。电动机的机械特性曲线与负载转矩特性曲线有交点,即  $T_{em} = T_L$  ( $T_L$  为负载转矩)。

(2)充分条件。在交点对应的转速之上有  $T_{em} < T_L$ ,在交点对应的转速之下有  $T_{em} > T_L$ 。

由此可见,对于恒转矩负载,若电动机的机械特性曲线是向下倾斜的,则系统能够稳定运行;若电动机的机械特性曲线是向上倾斜的,则系统不能稳定运行。

## 学习情境五 他励直流电动机的启动

启动是指当电动机接通电源后,由静止状态加速到稳定运行状态的过程。电动机在启动时,必须先加额定励磁电流,然后再加电枢电压。

设电动机在额定电压  $U_N$  下直接启动,当忽略电枢电感时,电枢电流  $I_a$  为

$$I_a = \frac{U_N - E_a}{R_a} \quad (1-27)$$

式中,  $E_a$  为电枢电动势(V)。

在电动机启动瞬间,转速  $n=0$ ,电枢电动势  $E_a=0$ ,则电枢电流  $I_a$  为启动电流  $I_{st}$ ,电磁转矩为启动转矩  $T_{st}$ ,即

$$I_{st} = \frac{U_N}{R_a} \quad (1-28)$$

$$T_{st} = C_T \Phi_N I_{st} \quad (1-29)$$

因为电枢绕组的电阻很小,故由式(1-28)可知,启动电流将较大,通常  $I_{st} = (10 \sim 20)I_N$ 。过大的启动电流一方面会使电动机在换向时产生较强的火花,甚至形成环火;另一方面会使电枢绕组因过热而烧毁。同时,大电流产生的大转矩会损坏传动机构。因此,除了小容量的电动机允许直接启动外,普遍容量和大容量的直流电动机均不允许直接启动。通常采取增加启动设备或限制电流的措施来控制电动机的启动过程。

一般直流电动机的启动有如下的要求:

(1)要有足够大的启动转矩,一般  $T_{st} \geq (1.1 \sim 1.2)T_N$ 。

(2)启动电流要限制在一定的范围之内。

(3)启动设备简单、可靠。

由式(1-28)可知,启动时限制电流的方法有两种:一是增加电枢回路电阻;二是降低电枢电压。

### 一、他励直流电动机电枢回路串联电阻启动

电枢回路串联电阻启动是指电动机在额定电压下启动时,在其电枢回路中串入分级电阻,在启动过程中将分级电阻逐个断开,启动结束时分级电阻全部断开。

如图 1-16 所示为电枢回路串联电阻启动的原理图。启动时,触头 KM1、KM2、KM3 断开,分级电阻全部串入电枢回路,在启动过程中,依次闭合触头 KM3、KM2、KM1。启动结束时,触头 KM1、KM2、KM3 全部闭合,电动机稳定运行。

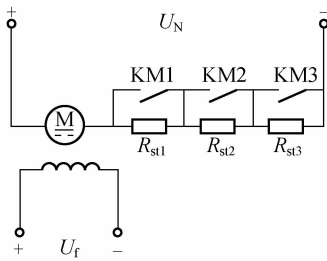


图 1-16 电枢回路串联电阻启动的原理

电枢回路串联电阻启动的机械特性如图 1-17 所示。现结合机械特性曲线分析其启动过程。

启动时,断开触头 KM1、KM2、KM3,分级电阻全部串联入电枢回路,启动电流  $I_{st}$  为

$$I_{st} = \frac{U_N}{R_a + R_{st1} + R_{st2} + R_{st3}} = \frac{U_N}{R}$$

式中,  $R$  为串联分级电阻后电枢回路的总电阻,  $R = R_a + R_{st1} + R_{st2} + R_{st3}$ 。

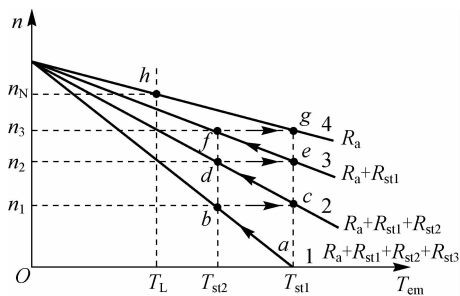


图 1-17 电枢回路串联电阻启动的机械特性

启动瞬间的机械特性为图 1-17 中曲线 1 上的  $a$  点,由于启动转矩  $T_{st}$  大于负载转矩  $T_L$ ,因此,电动机开始加速,电枢电动势  $E_a$  逐渐增大,电枢电流和电磁转矩逐渐减小,工作点沿曲线 1 箭头方向上升。

当转速增大到  $n_1$  时,闭合触头 KM3,对应曲线 1 上的  $b$  点(此时电流降为  $I'_{st}$ ,转矩降为  $T'_{st}$ )。切除电阻  $R_{st3}$  的瞬间,由于机械惯性,转速不能突变,所以工作点由曲线 1 上的  $b$  点沿水平方向平移到曲线 2 上的  $c$  点,此时,电动机又处于启动转矩  $T_{st1}$  大于负载转矩  $T_L$  的状态,工作点沿曲线 2 箭头方向再次上升。

同理,当工作点到达  $d$  点和  $f$  点时,依次闭合触头 KM2、KM1,切除电阻  $R_{st2}$ 、 $R_{st1}$ ,当启动过程结束时,电动机稳定运行于曲线 4 上的  $h$  点。一般情况下,在电枢绕组串联电阻启动的过程中,电阻的切除过程全部由自动控制设备完成。

电枢回路串联电阻启动的优点是操作简单、可靠,缺点是启动时电阻消耗的电能较多,效率较低。

## 二、他励直流电动机降压启动

降压启动是指启动前降低电动机电枢绕组两端的电压,以减小启动电流  $I_{st}$  的启动方法。当直流电源电压可调时,可以采用此方法,降压启动的机械特性如图 1-18 所示。



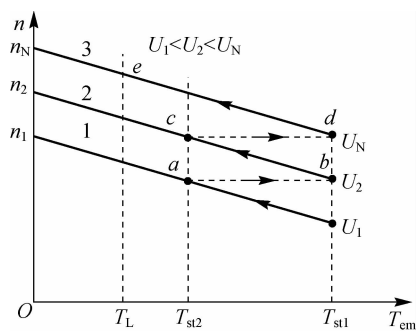


图 1-18 降压启动的机械特性

启动时,通过降低电源电压,使启动电流限制在电动机允许范围内。随着电动机转速的上升,电枢电动势  $E_a$  逐渐增大,电枢电流和电磁转矩逐渐减小,工作点沿图 1-18 中曲线 1 箭头方向开始上升。

当工作点到达  $a$  点时,升高电源电压,使电枢电流和电磁转矩增大到一定数值。由于在升高电压的瞬间,转速不能突变,因此,工作点由曲线 1 上的  $a$  点平移到曲线 2 的  $b'$  点。此时,由于启动转矩  $T_{st1}$  大于负载转矩  $T_L$ ,因此,电动机继续加速,工作点沿曲线 2 箭头方向继续上升。

同理,当电源电压升到额定值时,启动过程结束,电动机稳定运行于图 1-18 中的  $e$  点。

降压启动的优点是启动过程快、平稳,而且能量损耗小。缺点是需要专用电源设备,投资大。

## 学习情境六 他励直流电动机的制动

电动机的制动是指当电动机的电磁转矩  $T_{em}$  与转子旋转方向相反时,电磁转矩  $T_{em}$  为制动转矩,电动机将机械能转换为电能,使电动机停止转动的过程。常见的电气制动方法有能耗制动、反接制动和回馈制动。

### 一、他励直流电动机能耗制动

能耗制动是指电动机把拖动系统的动能转换为电能并消耗在电枢回路的电阻上,直到电动机停止转动的过程。

如图 1-19 所示为他励直流电动机能耗制动电路原理图。当电动机处于电动状态时,触头  $KM$  闭合、 $KM1$  断开。能耗制动时,触头  $KM$  断开、 $KM1$  闭合,能耗电阻  $R_b$  接入电枢回路,实现能耗制动。

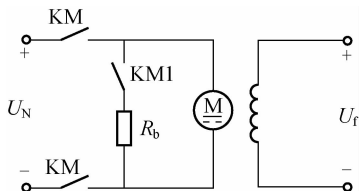


图 1-19 他励直流电动机能耗制动电路原理

当电动机处于稳定运行状态时,有

$$I_a = \frac{U_N - E_a}{R_a} > 0, \quad T_{em} = C_T \Phi_N I_a > 0$$

当电动机处于制动状态时,  $U_N = 0$ , 电枢回路在电枢电动势  $E_a$  的作用下产生与原电枢电流  $I_a$  反向的电枢电流  $I'_a$ , 由此产生的电磁转矩  $T'_{em}$  也与稳定运行状态时的电磁转矩  $T_{em}$  反向, 变为制动转矩, 即

$$I'_a = \frac{-E_a}{R_a} < 0, \quad T'_{em} = C_T \Phi_N I'_a < 0$$

此时电动机为制动状态, 电动机靠生产机械惯性力的拖动而发电(作发电机运行), 将动能转换为电能并消耗在电阻  $R_a + R_b$  上, 直到电动机停止转动为止。将  $U_N = 0, \Phi = \Phi_N, R = R_a + R_b$  代入电动机的机械特性方程式, 可知能耗制动时的机械特性为

$$\left. \begin{aligned} n &= -\frac{R_a + R_b}{C_e C_T \Phi_N^2} T_{em} \\ n &= -\frac{R_a + R_b}{C_e \Phi_N} I_a \end{aligned} \right\} \quad (1-30)$$

由式(1-30)可知, 能耗制动时的机械特性曲线是一条通过原点的直线, 如图 1-20 所示。曲线 2 上的  $BO$  段, 其理想空载转速为零。

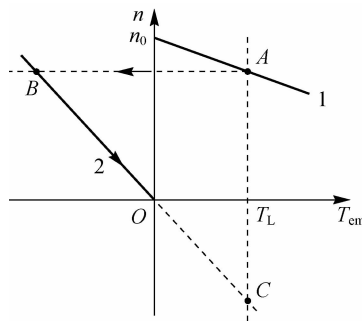


图 1-20 他励直流电动机能耗制动的机械特性

由能耗制动时的机械特性可知, 制动前电动机稳定运行于曲线 1 上的  $A$  点, 此时转速  $n > 0$ , 电磁转矩  $T_{em}$  为驱动转矩,  $T_{em} > 0$ 。制动开始时, 由于电枢电流  $I'_a < 0$ , 电磁转矩反向, 但是由于机械惯性, 转速不能突变, 故工作点将沿水平方向平移到曲线 2 上的  $B$  点。此时,  $T'_{em} < 0$ , 与电动机转子的方向相反, 电磁转矩为制动转矩, 于是电动机开始减速, 工作点  $B$  沿曲线 2 箭头方向开始下降。

### 1. 电动机拖动反抗性负载

反抗性负载是指负载转矩方向总是与电动机转动方向相反的负载。当工作点  $B$  下降到  $O$  点时,  $T_{em} = 0, n = 0$ , 电动机停止转动, 机械特性为  $BO$  段。

### 2. 电动机拖动位能性负载

位能性负载是指负载转矩具有固定的方向, 不随电动机转动方向的改变而改变的负载。当工作点到达  $O$  点时, 虽然  $T_{em} = 0, n = 0$ , 但在位能性负载的作用下, 开始反转。此时,  $n < 0$ , 电枢电动势  $E_a$  也随之反向, 则电磁转矩  $T_{em} > 0$ 。随着转速的增大, 电磁转矩也不断增大。当  $T_{em} > T_L$  时, 电动机稳定运行于曲线 2 上的  $C$  点, 机械特性曲线为虚线

OC 段。

由式(1-30)可知,机械特性曲线的斜率取决于能耗电阻的大小,能耗电阻越大,机械特性曲线的斜率越大,制动转矩越小,制动过程越缓慢;能耗电阻越小,机械特性曲线的斜率越小,制动转矩越大,制动过程越快。但是能耗电阻不能过小,否则制动电流会很大,通常制动电流不能超过额定电流的 2~2.5 倍,因此,能耗电阻应满足

$$R_b \geq \frac{E_a}{(2 \sim 2.5)I_N} - R_a \quad (1-31)$$

能耗制动的制动电路简单,设备经济、安全,且不需要从电网吸收电功率。常用于反抗性负载的准确停车和位能性负载的稳定下放。

## 二、他励直流电动机反接制动

常见的反接制动有电源反接制动和倒拉反接制动两种。

### 1. 电源反接制动

电源反接制动是指把正在运行的他励直流电动机的电源电压突然反极性接到电枢两端的制动过程。如图 1-21 所示为电源反接制动原理图,正常运行时,触头 KM 闭合,KM1 断开。制动时,触头 KM 断开,KM1 闭合,电源电压反接,电枢回路串入制动电阻  $R_b$ ,处于制动状态。

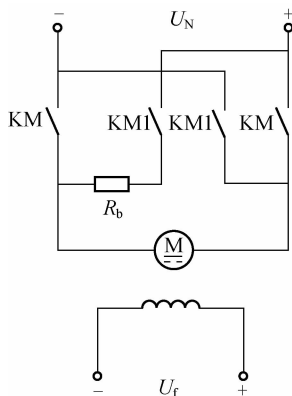


图 1-21 电源反接制动电路原理

反接制动时,电源电压  $U_N$  与电枢电动势  $E_a$  同向,此时产生的反向电枢电流为

$$I'_a = -\frac{U_N + E_a}{R_a + R_b} \quad (1-32)$$

此时,  $T_{em} < 0$ ,电磁转矩为制动转矩,电动机在制动转矩的作用下转速开始下降,实现制动。

由于反向电枢电流的大小由  $U_N$  和  $E_a$  共同决定,因此,反接制动时产生的反向电流很大。为了限制反向电枢电流  $I'_a$  不超过电动机额定电流的 2~2.5 倍,反接制动时常在电枢回路中串联制动电阻  $R_b$ ,电阻大小应满足

$$R_b \geq \frac{U_N + E_a}{(2 \sim 2.5)I_N} - R_a \quad (1-33)$$

将  $U = -U_N$ 、 $\Phi = \Phi_N$ 、 $R = R_a + R_b$  代入电动机的机械特性方程式,可得电源反接制动时

的机械特性为

$$\left. \begin{aligned} n &= -\frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_b}{C_e C_T \Phi_N^2} T_{em} \\ n &= -\frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_b}{C_e \Phi_N} I_a \end{aligned} \right\} \quad (1-34)$$

由式(1-34)可知,电源反接制动时的机械特性是一条通过 $(0, -n_0)$ 点的直线,如图 1-22 所示。

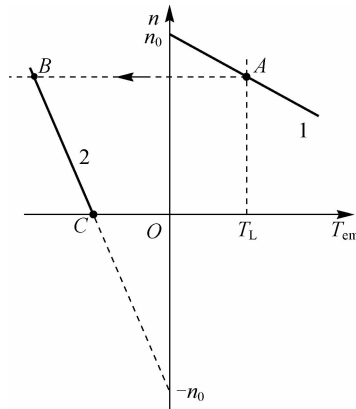


图 1-22 电源反接制动的机械特性

由电源反接制动的机械特性可知,制动前电动机稳定运行于曲线 1 上的 A 点,此时转速  $n > 0$ ,  $T_{em} > 0$ ,电磁转矩为驱动转矩。制动时,电枢电流  $I'_a < 0$ ,电磁转矩反向,但是由于机械惯性,转速不能突变,故工作点将沿水平方向平移到曲线 2 上的 B 点。此时,  $T'_{em} < 0$ ,电磁转矩为制动转矩,于是电动机开始减速,工作点 B 沿曲线 2 开始下降,到达 C 点时电动机停止转动,此时必须立刻断开电源,必要时应使用机械抱闸使电动机停车,否则电动机将反转。

## 2. 倒拉反接制动

倒拉反接制动是指制动时在电枢回路中串联大电阻,使电磁转矩小于负载转矩的制动过程,倒拉反接制动只适用于位能性负载。

如图 1-23 所示为倒拉反接制动原理图,制动时断开触头 KM,将制动电阻  $R_b$  串联到电枢回路,使电枢电流减小,电磁转矩随之减小且小于负载转矩( $T_{em} < T_L$ ),电动机处于制动状态,其机械特性如图 1-24 所示。

由倒拉反接制动机械特性可知,制动前电动机正常运行(提升重物)于曲线 1 上的 A 点。制动时,由于电枢回路上串联了制动电阻  $R_b$ ,电枢电流和电磁转矩均减小,但是由于机械惯性,转速不能突变,工作点由曲线 1 上的 A 点平移到曲线 2 上的 B 点,  $T_{em} < T_L$ ,电动机开始减速,工作点 B 沿曲线 2 开始下降,当到达 C 点时,电动机转速为零。但此时仍有  $T_{em} < T_L$ ,电动机在位能性负载的作用下将开始反转(下放重物),电磁转矩为制动转矩,电动机处于制动状态。此时,电磁转矩  $T_{em} > 0$ ,转速  $n < 0$ 。随着电动机转速的增大,当  $T_{em} = T_L$  时,电动机稳定运行于曲线 2 上的 D 点。

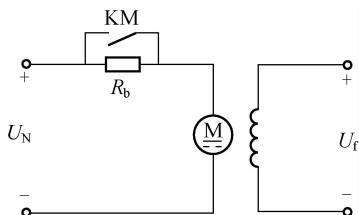


图 1-23 倒拉反接制动电路原理

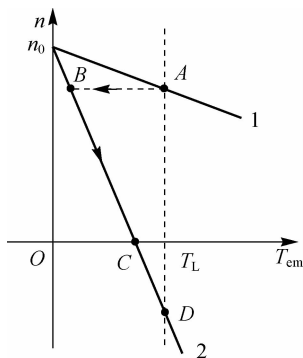


图 1-24 倒拉反接制动的机械特性

### 三、他励直流电动机回馈制动

回馈制动是指电动机工作过程中,在外部条件作用下会出现实际转速大于理想空载转速的情况。此时,电枢电动势  $E_a > U_N$ , 电枢电流  $I_a < 0$ ,  $T_{em} < 0$ , 电磁转矩由驱动转矩变为制动转矩,电动机作为发电机运行,将机械能转换成电能回馈给电网,也称为再生发电制动。其机械特性如图 1-25 所示。

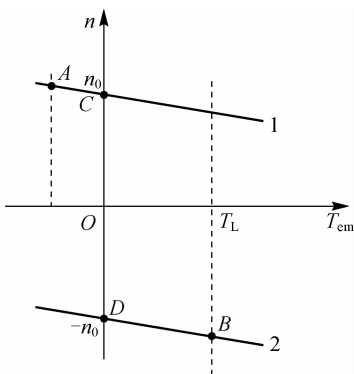


图 1-25 回馈制动的机械特性

#### 1. 正向回馈制动

由图 1-25 中曲线 1 可知,在位能性负载转矩的影响下,当负载下坡或下放重物时,电动机转速大于理想空载转速,运行于曲线 1 上的 A 点。此时,电磁转矩  $T_{em} < 0$ ,与负载转矩反向,是制动转矩,电动机向电网回馈电能,处于正向回馈制动状态,对应图中曲线 1 上的 AC 段。

#### 2. 反向回馈制动

由前面介绍的电压反接制动可知,当电动机转速为零时,若不切断电源,则电动机便在位能性负载的作用下反向加速,见图 1-25 中曲线 2。当电动机转速大于理想空载转速时,电动机处于反向回馈制动状态。此时,电磁转矩  $T_{em} > 0$ ,  $n < 0$ ,电动机速度逐渐加快,最后稳定运行于曲线 2 上的 B 点,对应于曲线 2 上的 DB 段。

回馈制动常出现在电动机降压调速和增磁通调速的时候,降压调速和增磁通调速的机械特性如下。

(1) 降压调速回馈制动的机械特性如图 1-26 所示, 正常运行时, 电动机稳定运行于曲线 1 上的 A 点。当进行降压调速时, 由于转速不能突变, 工作点由曲线 1 上的 A 点平移到曲线 2 上的 B 点, 曲线 BD 段即为回馈制动过程, 当转速降到  $n_B$  时制动过程结束, 电动机进入减速状态 DC 段。

(2) 增磁通调速回馈制动的机械特性如图 1-27 所示, 正常运行时, 电动机稳定运行于曲线 1 上的 A 点。当进行增磁通调速(磁通未达到额定值)时, 工作情况同降压调速时的回馈制动一样, 曲线 BD 段为回馈制动过程。

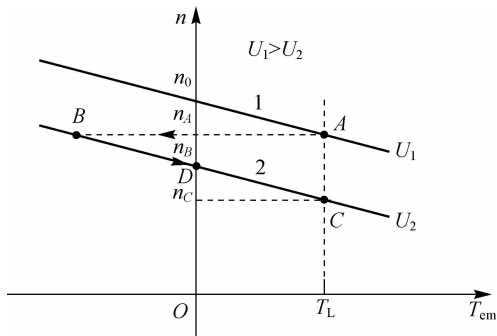


图 1-26 降压调速回馈制动的机械特性

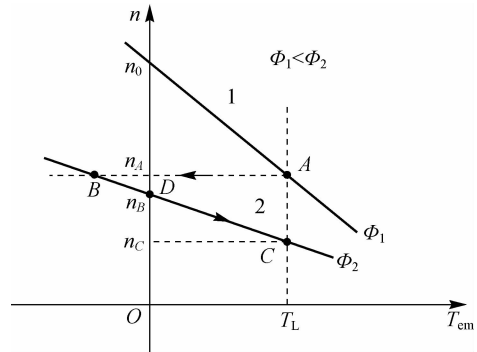


图 1-27 增磁通调速回馈制动的机械特性

## 学习情境七 他励直流电动机的调速

调速就是根据生产机械的要求人为地改变电动机的转速。如果机械特性不变, 由于负载变化引起的电动机转速的变化不能称为调速。

调速可用机械调速(改变传动机构速比进行调速)、电气调速(改变电动机参数进行调速)和机械与电气配合调速。本节只介绍几种他励直流电动机常用的电气调速方法。

### 一、他励直流电动机调速指标

电动机调速性能的评价指标包括调速范围、相对稳定性、平滑性和经济性等。

#### 1. 调速范围

调速范围是指电动机在额定负载下所能达到的最高转速  $n_{\max}$  与最低转速  $n_{\min}$  之比, 通常用字母  $D$  表示, 即

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1-35)$$

不同的生产机械的调速范围也不尽相同, 如一般车床  $D$  为 20~120, 轧钢机  $D$  为 3~120。若要扩大调速范围只能提高最大转速或降低最小转速。电动机的最大转速受到机械强度、换向条件和电压等级等方面的限制, 最小转速受到相对稳定性的限制。

#### 2. 相对稳定性

相对稳定性是指电动机在负载转矩发生变化时, 转速随之变化的程度。工程上常用静差率来表示, 即当电动机在同一条机械特性上运行时, 从理想空载到额定负载时的转速降

$\Delta n_N$  与理想空载转速  $n_0$  之比,用百分比  $\delta\%$  表示为

$$\delta\% = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\% = \frac{n_0 - n_N}{n_0} \times 100\% \quad (1-36)$$

静差率  $\delta\%$  反映了拖动系统的相对稳定性,当理想空载转速  $n_0$  不变时,电动机的机械特性越硬,静差率就越小,相对稳定性就越好。

### 3. 平滑性

在一定的调速范围内,调速的级数越多就认为调速越平滑,平滑的程度用相邻两级转速之比  $\varphi$  表示,即

$$\varphi = \frac{n_i}{n_{i-1}}$$

$\varphi$  值越接近 1,平滑性越好,当  $\varphi=1$  时称为无级调速,即转速可以连续调节。

### 4. 经济性

调速的经济性取决于调速系统的设备投资、运行效率及运行费用等。

在满足技术要求的前提下,调速方案应力求设备投资少,损耗小,维修方便。

## 二、他励直流电动机调速方法

常见的调速方法有电枢回路串联电阻调速、降低电源电压调速和减弱磁通调速。

### 1. 电枢回路串联电阻调速

当他励直流电动机运行于额定电压和额定励磁电流时,通过在电动机电枢回路中串联不同阻值的电阻实现调速的方法称为电枢回路串联电阻调速。

如图 1-28 所示为电枢回路串联电阻调速的原理图。电动机正常运行时,触头 KM1、KM2 闭合,当需要调速时,依次断开 KM1、KM2,此时电枢回路串入电阻,从而实现调速。其机械特性如图 1-29 所示。现结合机械特性分析其调速过程。

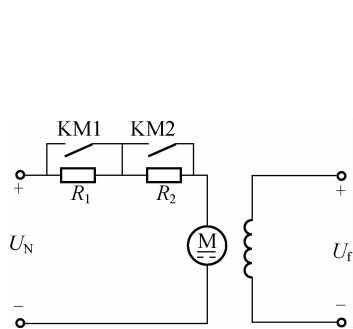


图 1-28 电枢回路串联电阻调速的电路原理

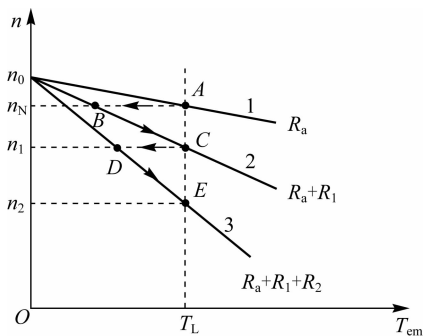


图 1-29 电枢回路串联电阻调速的机械特性

假设电动机正常运行时,稳定运行于曲线 1 上的 A 点,电动机转速为  $n_N$ 。当断开触头 KM1 时,电枢回路串入电阻  $R_1$ ,电枢电流  $I_a$  减小,从而导致电磁转矩减小。但由于机械惯性,转速不能突变,故工作点由曲线 1 上的 A 点平移到曲线 2 上的 B 点,此时  $T_{em} < T_L$ ,电动机开始减速并沿曲线 2 开始下降。当  $T_{em} = T_L$  时,电动机稳定运行于 C 点,此时,电动机转速为  $n_1$ 。

同理,当断开触头 KM2 时,由于电阻  $R_2$  串入电枢回路,使得电枢电流和电磁转矩减小,

因此,工作点由曲线 2 上的 C 点平移到曲线 3 上的 D 点,最后稳定运行于 E 点,这时电动机的转速为  $n_2$ ,从而实现电动机转速的调节。显然,当串入电枢回路的电阻阻值越大时,电动机运行的转速越低。

电枢回路串联电阻调速的优点是方法简单,操作方便;缺点是相对稳定性差,而且串入电阻使能耗增大,经济性较差。常用于电动机拖动的电车、炼钢车间的生产机械等设备中。

## 2. 降低电源电压调速

当他励直流电动机在额定励磁电流下运行且保证电枢电阻不变时,通过调节电动机电枢两端的电压而实现调速的方法称为降低电源电压调速,简称为降压调速。由于电动机的工作电压不允许超过额定电压,因此,电源电压只能在额定电压以下进行调节,如图 1-30 所示为降压调速的机械特性。

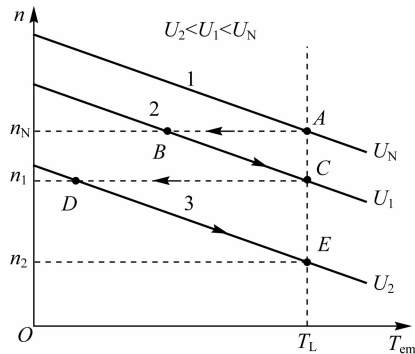


图 1-30 降压调速的机械特性

现结合机械特性曲线分析其调速过程。假设电动机在额定电压  $U_N$  下稳定运行于曲线 1 上的 A 点,电动机转速为  $n_N$ 。当电压降低为  $U_1$  时,电枢电流  $I_a$  减小,从而导致电磁转矩减小。但由于机械惯性,转速不能突变,因此,工作点由曲线 1 上的 A 点平移到曲线 2 上的 B 点,此时  $T_{em} < T_L$ ,电动机开始减速并沿曲线 2 下降。当到  $T_{em} = T_L$  时,电动机稳定运行于 C 点,此时电动机转速为  $n_1$ 。同理,当电压降低为  $U_2$  时,工作点由曲线 2 上的 C 点平移到曲线 3 上的 D 点,最后稳定运行于 E 点,这时电动机的转速为  $n_2$ 。可见,电源电压越低,电动机转速也越低。

降压调速的优点如下。

- (1) 由于电源电压可连续调节,因此,可以实现无级调速。
- (2) 调速前后机械特性的斜率不变,负载变化时转速稳定性好。
- (3) 调速范围较宽,一般为 2.5~12。
- (4) 调速过程能耗小,且经济性好。

缺点是调速时需要一套电压可连续调节的直流电源,设备投资大。

## 3. 减弱磁通调速

当他励直流电动机在额定电压下运行且保证电枢电阻不变时,通过调节励磁电流(磁通)而实现调速的方法称为减弱磁通调速。由于电动机在额定状态下运行时,磁路已基本饱和,即使励磁电流增大很多,磁通的增加量也很少,而且一般也不允许磁路过饱和,因此,磁通只能在额定值以下进行调节。如图 1-31 所示为减弱磁通调速的机械特性。



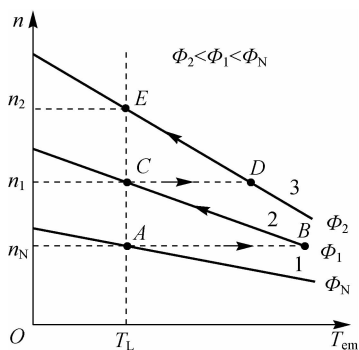


图 1-31 减弱磁通调速的机械特性

现结合机械特性曲线分析其调速过程。假设电动机正常运行时,稳定运行于曲线 1 上的 A 点,电动机转速为  $n_N$ 。当磁通减弱为  $\Phi_1$  时,电动势  $E_a$  随之减小,电枢电流  $I_a$  迅速增大。一般情况下,电枢电流的增加量比磁通的减少量大,因而电磁转矩增大。但由于机械惯性,转速不能突变,故工作点由曲线 1 上的 A 点平移到曲线 2 上的 B 点。此时  $T_{em} > T_L$ ,所以电动机开始加速并沿曲线 2 开始上升。当  $T_{em} = T_L$  时,电动机稳定运行于 C 点,此时电动机转速为  $n_1$ 。同理,当磁通减弱为  $\Phi_2$  时,工作点由曲线 2 上的 C 点平移到曲线 3 上的 D 点,最后稳定运行于 E 点,此时电动机的转速为  $n_2$ 。显然当磁通越小时,电动机的转速越高。

减弱磁通调速的优点如下。

- (1) 由于励磁电流  $I_f \ll I_a$ , 因而控制方便且能耗较小。
- (2) 设备简单,平滑性好,可实现无级调速。

减弱磁通调速的缺点是受电动机机械强度的限制以及会产生换向火花,调速范围  $D$  不大,一般为 1.2~1.5。



## 技能训练

### 他励直流电动机工作特性的测定

通常,他励直流电动机的工作特性由电动机的转速  $n$ 、电磁转矩  $T_{em}$  和效率  $\eta$  三者与输出功率  $P_2$  之间的关系曲线  $n=f(P_2)$ 、 $T_{em}=f(P_2)$ 、 $\eta=f(P_2)$  表示。在实际运行中,由于电枢电流  $I_a$  较易测得,而  $I_a$  随着  $P_2$  的增加而增大,因此,直流电动机的工作特性也可用曲线  $n=f(I_a)$ 、 $T_{em}=f(I_a)$ 、 $\eta=f(I_a)$  表示。

#### 一、实训目的

- (1) 认识直流电机、常用测量仪器和仪表等实训设备。
- (2) 掌握直流电动机工作特性的测定方法。

#### 二、实训仪器和仪表

直流电动机、直流发电机、直流电压表、直流电流表、转速表等。

### 三、实训方法和步骤

(1)如图 1-32 所示为测定他励直流电动机工作特性的电路接线图。直流电动机的负载可选用直流发电机,直流发电机的负载可选用变阻器  $R_L$ 。

(2)断开直流发电机的励磁电源及负载电阻  $R_L$  (断开接触器触头 KM3、KM4),将电动机的励磁变阻器  $R_{f1}$  置于最小值,启动直流电动机。

(3)将发电机励磁变阻器  $R_{f2}$  置于最大值,接入发电机的励磁电源(闭合接触器触头 KM3),调节励磁电阻  $R_{f2}$  的值,使发电机励磁电流  $I_{f2}$  为额定值( $I_{f2} = I_{GN}$ )并保持不变。

(4)闭合接触器触头 KM4,接入直流发电机的负载电阻  $R_L$ ,在保持电动机电枢电压  $U = U_N, n = n_N$  的条件下,逐渐增加发电机的负载,使电动机电枢电流达到额定值。

(5)在保持电动机电枢电压  $U = U_N$ ,电动机及发电机的励磁电流不变的条件下,逐渐减小发电机的负载,直到发电机的电枢电流  $I_G = 0$  为止。同步测取 5~6 组电动机电枢电流  $I_a$ 、电动机转速  $n$ 、发电机电枢电流  $I_G$  和电枢电压  $U_G$  值,记入表 1-1 中。

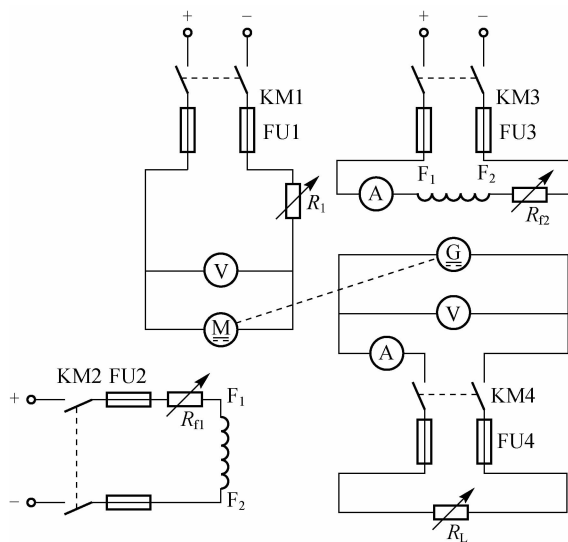


图 1-32 测定他励直流电动机工作特性的电路接线图

表 1-1 他励直流电动机工作特性测量数据

测量值				计算值			
电动机电枢 电流 $I_a/A$	电动机转速 $n/(r/min)$	发电机电枢 电压 $U_G/V$	发电机电枢 电流 $I_G/A$	电动机输入 功率 $P_1/W$	电动机输出 功率 $P_2/W$	电动机输出转 矩 $T_2/(N \cdot m)$	电动机 效率 $\eta$

注:测量数据一般为 5~6 组。

#### 四、数据处理

(1) 根据实验要求, 正确记录实验数据。

(2) 计算直流电动机的输入功率、输出功率、输出转矩和电动机效率。

电动机输入功率为

$$P_1 = U_a I_a$$

电动机输出功率为

$$P_2 = P_{1G} = \frac{P_{2G}}{\eta_G} = \frac{U_G I_G}{\eta_G}$$

电动机输出转矩为

$$T_2 = 9.55 \frac{P_2}{n}$$

电动机效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

式中,  $U_a$ 、 $I_a$  为电动机电枢电压和电枢电流;  $U_G$ 、 $I_G$  为发电机电枢电压和电枢电流;  $P_{1G}$  为发电机输入功率;  $P_{2G}$  为发电机输出功率;  $\eta_G$  为发电机效率, 可由效率曲线查得。

(3) 绘制直流电动机的工作特性曲线  $n$ 、 $T_{em}$ 、 $\eta$ 。



#### 单元练习

1. 一台直流电动机额定功率为 180 kW, 额定电压为 230 V, 效率为 89.5%, 求额定输入功率和额定电流。
2. 如何判断直流电机是运行于发电机状态还是电动机状态? 能量转换关系如何?
3. 已知某直流电动机的额定功率  $P_N = 240$  kW, 额定电压  $U_N = 460$  V, 额定转速  $n_N = 600$  r/min, 试求该电动机的额定电流。
4. 一台直流发电机,  $2p = 2$ ,  $2a = 2$ , 电枢导体总数为 216, 额定转速  $n_N = 1400$  r/min, 每极磁通  $\Phi = 2.2 \times 10^{-2}$  Wb, 试求: (1) 电枢绕组的感应电动势; (2) 当电动机使用时, 若电枢电流  $I_a = 500$  A, 总电磁转矩为多少?
5. 一台直流电动机的额定数据如下:  $P_N = 17$  kW,  $U_N = 220$  V,  $n_N = 3000$  r/min,  $I_N = 88.9$  A, 电枢回路电阻  $R_a = 0.0896$   $\Omega$ , 励磁回路电阻  $R_f = 181.5$   $\Omega$ , 若忽略电枢电感的影响, 试求: (1) 电动机的额定输出转矩; (2) 在额定负载时的电磁转矩; (3) 在额定负载时的效率; (4) 在理想空载 ( $I_a = 0$ ) 时的转速。
6. 他励直流电动机的固有机械特性和人为机械特性分别指什么? 各有何特点?
7. 电力拖动系统稳定运行的条件是什么?
8. 他励直流电动机为什么不能直接启动? 常见的启动方法有哪几种? 各有什么特点?
9. 他励直流电动机启动时为什么要先加励磁电流?
10. 他励直流电动机的调速方法有哪些? 各适用于什么场合? 有何特点?
11. 什么是他励直流电动机的制动? 制动的的方法有哪些? 各有何特点?

## 单元二

# 变 压 器

### 知识目标

掌握变压器的工作原理、基本结构和参数；  
掌握单相变压器的空载运行和负载运行情况；  
掌握三相变压器的磁路系统和连接方法。

### 技能目标

能正确测定单相变压器的参数；  
能正确计算变压器的效率及损耗；  
能正确连接三相变压器。

### 单元导读

变压器是一种静止的电机，它是利用电磁感应原理将一种等级的交流电能转变成另一种(或几种)同频率而不同等级的交流电能的电气设备，以实现电能在不同电压等级或电流等级之间的传输。

在电力系统和自动控制系统中，变压器作为电能传递或信号传递的元件，被广泛地应用于国民经济的各个部门。变压器的主要作用是变换电压，以利于功率的传输。电压经升压变压器升压后，可以减少线路损耗，提高送电的经济性，达到远距离送电的目的。而降压变压器则能把高电压变为用户所需要的各级使用电压，满足用户需要。

### 相关知识

## 学习情境一 变压器概述

### 一、变压器的基本工作原理

变压器是基于电磁感应原理工作的，它主要由铁芯和套在铁芯上的两个相互绝缘的线圈组成，线圈之间只有磁的耦合，而没有电的联系。如图 2-1 所示为变压器工作原理，图中与电源相连的线圈为“一次绕组”，用来接收交流电能；与负载相连的线圈为“二次绕组”，用来送出交流电能。 $N_1$  为一次绕组匝数， $N_2$  为二次绕组匝数。



当一次绕组两端加交流电压  $u_1$  时,绕组中便有与  $u_1$  相同频率且同时交链一、二次绕组的交变磁通  $\Phi$ 。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  $e_2$ ,当不考虑漏磁通及绕组电阻时,电动势平衡方程式为

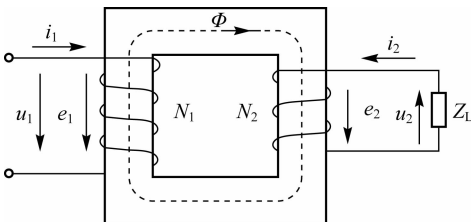


图 2-1 变压器工作原理

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ u_2 &= -e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

式中,  $u_2$  为二次绕组空载电压(V);  $\Phi$  为主磁通(Wb)。

由式(2-1)可知,一、二次绕组的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,这就是变压器利用电磁感应原理,将一种等级的电压转换成同频率的另一种等级的电压的基本工作原理。

## 二、变压器的基本结构

下面以油浸式电力变压器为例来说明变压器的基本结构。油浸式电力变压器的主要部件有铁芯和绕组(俗称为器身)、油箱和冷却装置、保护装置等。如图 2-2 所示为油浸式电力变压器的外部结构。

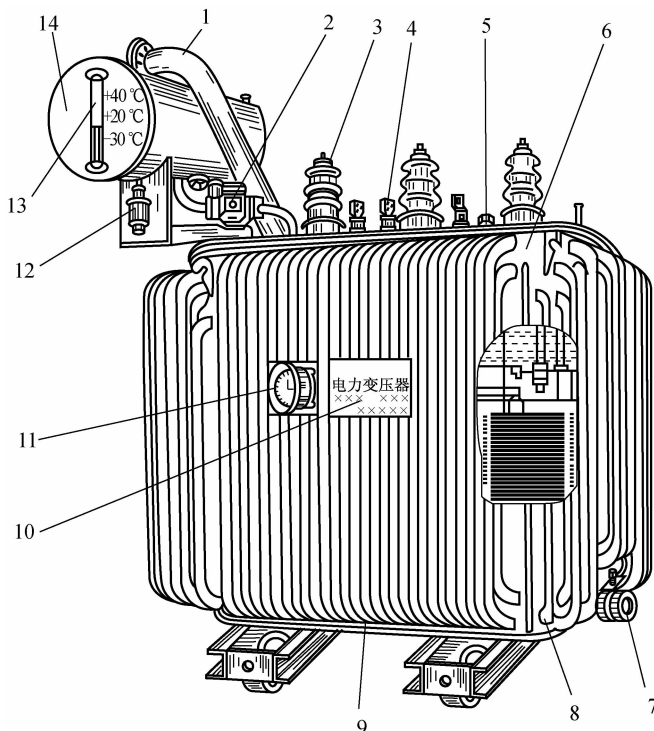


图 2-2 油浸式电力变压器的外部结构

- 1—安全气道; 2—气体继电器; 3—高压套管; 4—低压套管; 5—分接开关; 6—油箱; 7—放油阀门;  
8—散热器; 9—接地板; 10—铭牌; 11—温度计; 12—吸湿器; 13—油表; 14—储油柜

## 1. 铁芯

铁芯是变压器的主磁路,又作为绕组的支撑骨架。铁芯分铁芯柱和铁轭两部分,铁芯柱上装有绕组,铁轭将铁芯柱连接起来形成闭合磁路。

### 1) 铁芯材料

为了提高磁路的导磁性能,减少铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗,铁芯一般用高磁导率的磁性材料——硅钢片叠成。硅钢片有热轧和冷轧两种,其厚度为 $0.35\sim 0.5\text{ mm}$ ,两面涂以厚 $0.02\sim 0.23\text{ mm}$ 的漆膜,使片与片之间绝缘。

### 2) 铁芯形式

变压器铁芯的结构有心式和壳式两种形式。心式结构的特点是铁芯柱被绕组包围,如图 2-3 所示。壳式结构的特点是铁芯包围绕组的顶面、底面和侧面,如图 2-4 所示。壳式结构的机械强度较好,但制造复杂。

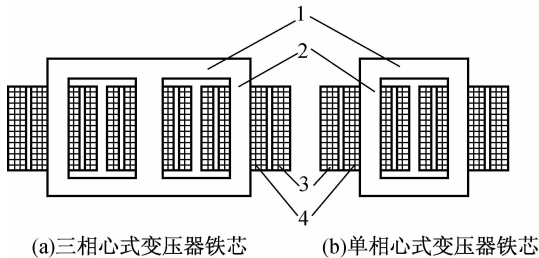


图 2-3 心式变压器铁芯的结构

1—铁轭; 2—铁芯柱; 3—高压绕组; 4—低压绕组

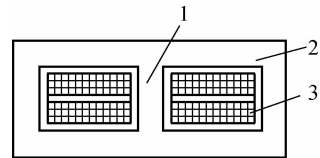


图 2-4 壳式变压器铁芯的结构

1—铁芯柱; 2—铁轭; 3—绕组

## 2. 绕组

为了使绕组在电磁力作用下受力均匀且具有良好的力学性能,一般电力变压器都把绕组绕制成圆形。

绕组是变压器的电路部分,它由铜或铝绝缘导线绕制而成。它们通常套装在同一个铁芯柱上,一、二次绕组具有不同的匝数。通过电磁感应作用,一次绕组的电能就可传递到二次绕组,且二次绕组中的电压和电流值与一次绕组中不同。

在两个绕组中,电压较高的称为高压绕组,电压较低的称为低压绕组。从高、低压绕组的相对位置来看,变压器的绕组可分为同心式绕组和交叠式绕组。同心式绕组结构简单,制造方便;交叠式绕组机械强度好,引线方便,但是漏电抗小。

## 3. 油箱和冷却装置

变压器的油箱是变压器的外壳,起一定的绝缘和散热作用,内装铁芯、绕组和变压器油。

冷却装置有降低变压器油温的作用。当变压器上层油面温度上升时,通过散热器形成循环油路,使变压器油经散热器冷却后流回油箱。

## 4. 保护装置

### 1) 吸湿器

目前使用最多的吸湿器是悬挂式吸湿器,上端通过连通管接到储油柜(油枕),下端有孔与大气相通。吸湿器内装有硅胶或氯化钙等吸潮剂,用来除去吸入空气中的尘埃和水分。



## 2) 气体继电器

气体继电器又称瓦斯继电器,是变压器重要的保护元件。其作用是当变压器内部发生故障、油中产生气体或油箱漏油使油面降低时,气体继电器动作,发出信号或使断路器跳闸,以保护变压器。另外,发生故障后,可以通过气体继电器的视窗观察气体的颜色进行分析,从而对故障性质作出判断。

## 3) 高、低压套管

套管是变压器的重要组件之一,其作用是把变压器的高、低压绕组的引线分别引到油箱的外部。套管不但使引线与油箱绝缘,而且还起固定引线的作用。

# 三、变压器的分类和额定参数

## 1. 变压器的分类

变压器按用途可以分为电力变压器和特种变压器两大类。电力变压器是电力系统中输配电力的主要设备,又可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器和厂用变压器等。特种变压器是指根据不同系统和部门的要求,用于各种特殊用途的变压器,如电炉变压器、整流变压器、电焊变压器、仪用互感器、试验用高压变压器和调压变压器等。

变压器按绕组的构成可分为双绕组变压器、三绕组变压器、多绕组变压器和自耦变压器。

变压器按铁芯结构可分为壳式变压器和心式变压器。

变压器按相数可分为单相变压器、三相变压器和多相变压器。

变压器按冷却介质和冷却方式可分为干式变压器、油浸式变压器(油浸自冷式、油浸风冷式和强迫油循环式等)和充气式变压器。

## 2. 变压器的额定参数

变压器的额定参数是制造厂商对变压器正常使用所做的规定,通常都标注在变压器的铭牌上。变压器在规定的额定参数状态下运行,可以保证其能长期可靠地工作,并且有良好的性能。变压器的铭牌上标注的额定参数主要包括以下几方面。

### 1) 额定电流

额定电流  $I_{1N}$ 、 $I_{2N}$  是指变压器按规定的工作方式(长时连续工作、短时工作或间歇断续工作)运行时允许通过的最大电流。

### 2) 额定电压

额定电压  $U_{1N}$  又称为变压器额定运行时,根据变压器的绝缘强度和散热条件而规定加于一次绕组上的电压值;额定电压  $U_{2N}$  是指一次绕组电压为额定值时,二次绕组两端的空载电压值。

### 3) 额定容量

额定容量  $S_N$  又称为视在功率,是指变压器二次侧额定电压和额定电流的乘积,它反映了变压器传递功率的能力,单位为  $kV \cdot A$ 。

对于单相变压器,忽略内部损耗时有

$$S_N = U_{2N} I_{2N} = U_{1N} I_{1N} \quad (2-2)$$

式中,  $U_{1N}$ 、 $U_{2N}$  为线电压(V);  $I_{1N}$ 、 $I_{2N}$  为线电流(A)。

对于三相变压器,忽略内部损耗时有

$$S_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} \quad (2-3)$$

## 4) 额定频率

额定频率  $f_N$  是指变压器正常工作的频率值,我国规定工业用电的额定频率为 50 Hz。

## 5) 额定温升

额定温升是指以环境温度作为参考温度,规定在变压器正常运行中允许温度超出参考温度的最大值,一般把 40 °C 作为参考温度。按照我国的标准规定,变压器绕组的温升限值为 65 °C,上层油面的温升限值为 35 °C,并限制变压器的上层油面温度最高不超过 95 °C。

**例 2-1** 一台三相油浸自冷式电力变压器,  $S_N=5\,000\text{ kV}\cdot\text{A}$ ,  $U_{1N}/U_{2N}=10\text{ kV}/6.3\text{ kV}$ , 一、二次绕组均为星形联结,忽略内部损耗求变压器的一、二次侧额定电流。

**解** 变压器的一、二次侧额定电流分别为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{5\,000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10 \times 10^3} \text{ A} = 288.68 \text{ A}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{5\,000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6.3 \times 10^3} \text{ A} = 458.23 \text{ A}$$

## 学习情境二 单相变压器的空载运行

变压器的空载运行是指变压器的一次绕组接在额定电压的交流电源上,而二次绕组开路的运行方式。

### 一、单相变压器空载运行时的电磁关系

#### 1. 参考方向的规定

变压器中的电压、电流、磁通及电动势的大小和方向都是时间的变化量,为了能正确表明各量之间的关系,需要规定它们的参考方向。参考方向的规定不同,所列方程式的正负不同。一般按照电工习惯规定如下:

(1) 在负载支路,电流的正方向与电压降的正方向一致;而在电源支路,电流的正方向与电动势的正方向一致。

(2) 电流  $i$  与其磁动势所建立的磁通  $\Phi$  的正方向符合右手螺旋法则。

(3) 由磁通  $\Phi$  产生的感应电动势  $e$  的正方向与产生该磁通的电流  $i$  的正方向一致。

(4) 电压  $u_1$ 、 $u_2$  的正方向表示电位降低,电动势  $e_1$ 、 $e_2$  的正方向表示电位升高。

#### 2. 空载运行时的物理情况

如图 2-5 所示为单相变压器空载运行原理图。

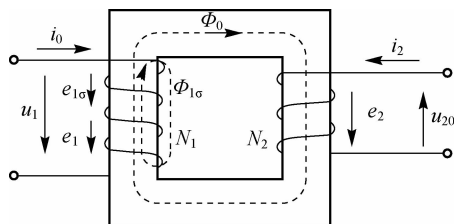


图 2-5 单相变压器空载运行





当一次绕组接入交流电压  $u_1$  时,一次绕组中便有交变电流产生,由于变压器的二次绕组没有接入任何负载,即  $i_2=0$ ,所以称一次绕组中产生的电流为空载电流  $i_0$ 。由  $i_0$  产生空载磁动势  $F_0=N_1i_0$ ,并建立交变的空载磁场。一般情况下,将磁通分为两部分:一部分(绝大部分)磁通通过铁芯形成闭合回路,同时交链一、二次绕组,产生感应电动势  $e_1$  和  $e_2$ ,这部分称为主磁通  $\Phi_0$ ;另有一小部分磁通(约为主磁通的 0.25% 左右)经空气或变压器油等形成闭合回路,称为漏磁通  $\Phi_{1\sigma}$ ,它在一次绕组中产生漏磁电动势  $e_{1\sigma}$ 。

### 3. 感应电动势和空载电流

#### 1) 主磁通感应电动势

假设变压器运行时一次绕组上加正弦交流电压  $u_1$ ,则穿过一次绕组的交变主磁通为  $\Phi_0$ ,且主磁通按正弦规律变化,即

$$\Phi_0 = \Phi_m \sin \omega t \quad (2-4)$$

式中,  $\Phi_m$  为主磁通的幅值, Wb;  $\omega$  为磁通变化的角频率, rad/s。

根据电磁感应定律,一、二次绕组感应电动势的瞬时值为

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = -\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t = \omega N_1 \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ &= 2\pi f N_1 \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = E_{1m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \quad (2-5)$$

同理有

$$\begin{aligned} e_2 &= -N_2 \frac{d\Phi_0}{dt} = -\omega N_2 \Phi_m \cos \omega t = \omega N_2 \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ &= 2\pi f N_2 \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = E_{2m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \quad (2-6)$$

式中,  $f$  为电源频率(Hz);  $E_{1m}$ 、 $E_{2m}$  分别为一、二次绕组感应电动势的最大值(V)。

由式(2-5)和式(2-6)可知,当主磁通  $\Phi_0$  按正弦规律变化时,由它产生的感应电动势也按正弦规律变化,但在时间和相位上滞后于主磁通  $\pi/2$ 。

一、二次绕组感应电动势的有效值分别为

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\pi f N_1 \Phi_m = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (2-7)$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\pi f N_2 \Phi_m = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (2-8)$$

一、二次绕组感应电动势的相量表示分别为

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m \quad (2-9)$$

$$\dot{E}_2 = -j4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m \quad (2-10)$$

由式(2-7)和式(2-8)可知,一次绕组与二次绕组感应电动势的有效值与线圈匝数的关系为

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = K = K_u \quad (2-11)$$

式中,  $K_u$  为匝数比或电压比;  $K$  为变比。

式(2-11)表明,变压器的电压比为一次绕组与二次绕组的匝数(电压)比。当  $K>1$  时,为降压变压器;  $K<1$  时,为升压变压器。

### 2) 漏磁通感应电动势

在变压器空载运行时,一次绕组的漏磁通  $\Phi_{1\sigma}$  也将在一次绕组中感应产生一个漏磁电动势  $e_{1\sigma}$ ,而且它也是随时间交变的。

根据前面的分析,同样可得出

$$E_{1\sigma} = \frac{\omega N_1 \Phi_{1\sigma m}}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \Phi_{1\sigma m} \quad (2-12)$$

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_{1\sigma m} \quad (2-13)$$

式中,  $E_{1\sigma}$  为漏磁电动势的有效值(V);  $\Phi_{1\sigma m}$  为一次漏磁通的幅值(Wb)。

为简化分析和计算,也可用电抗压降的形式表示为

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j\omega_1 L_{1\sigma} \dot{I}_0 = -jX_1 \dot{I}_0 \quad (2-14)$$

式中,  $L_{1\sigma}$  为漏电感(H);  $X_1$  为漏电抗( $\Omega$ );  $\dot{I}_0$  为空载电流(A)。

因为漏磁通的主要路径是非铁磁物质,磁路不会饱和,所以磁阻是常数。因此,对已制成的变压器,漏电感  $L_{1\sigma}$  为常数,当频率一定时,漏电抗也是常数。

### 3) 空载电流

变压器空载运行时的空载电流  $\dot{I}_0$  主要有两个作用:一个是建立空载时的磁场;另一个是补偿空载时的损耗。因此,空载电流  $\dot{I}_0$  包含两个分量:一个为无功励磁分量,它与主磁通同相位;另一个为很小的用来平衡铁芯损耗和空载绕组损耗的有功分量。由于无功分量远大于有功分量,因此,通常将空载电流称为励磁电流。

## 二、单相变压器空载时的平衡方程、等效电路和相量图

### 1. 电动势平衡方程

按照图 2-5 中规定的正方向,根据基尔霍夫第二定律,可知一次侧的电动势平衡方程为

$$U_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 R_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_0 X_1 + \dot{I}_0 R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \quad (2-15)$$

式中,  $Z_1$  为一次绕组的漏阻抗,  $Z_1 = R_1 + jX_1, \Omega$ 。

由于变压器空载运行时,阻抗压降  $\dot{I}_0 Z_1$  很小(一般小于  $0.5\%U_1$ ),可认为  $U_1 \approx -\dot{E}_1$ 。由于二次侧电流  $I_2 = 0$ ,可得二次侧的电动势平衡方程为

$$U_{20} = \dot{E}_2 \quad (2-16)$$

式中,  $U_{20}$  为变压器二次侧电压, V。

### 2. 等效电路和相量图

变压器的工作原理是基于电磁感应定律。在变压器中,由于存在电与磁之间相互耦合的问题,给变压器的分析、计算带来很大的麻烦。如果能用纯电路的形式“等效”地表示出电与磁之间相互耦合的关系,就可以简化其分析和计算的过程,这就是画等效电路的目的。

漏磁通产生的漏磁电动势  $E_{1\sigma}$ ,在数值上可用空载电流  $I_0$  流过漏电抗  $X_1$  时所产生的电压降  $I_0 X_1$  来表示。同样,由主磁通产生的感应电动势  $E_1$ ,也可用空载电流  $I_0$  流过电路中某一元件时所产生的电压降来表示。设该电路元件的励磁电阻为  $R_f$  对应铁芯损耗的等效电阻,励磁电抗为  $X_f$ ,励磁阻抗为  $Z_f$ 。因此,  $E_1$  可用相量形式表示为

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_f = \dot{I}_0 (R_f + jX_f) \quad (2-17)$$

将式(2-17)代入式(2-15),可得



$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 Z_f + \dot{I}_0 Z_1 = \dot{I}_0 (Z_f + Z_1) \quad (2-18)$$

式(2-18)对应的等效电路如图 2-6 所示。

由前面的分析可知,在电压一定时,变压器的空载电流  $I_0$  的大小主要由励磁阻抗  $Z_f$  的大小决定。一般情况下,希望空载电流  $I_0$  越小越好,所以变压器采用高导磁率的铁磁材料来增大励磁阻抗  $Z_f$ ,从而减小空载电流  $I_0$ ,提高运行效率和功率因数。

变压器空载时的相量图如图 2-7 所示。

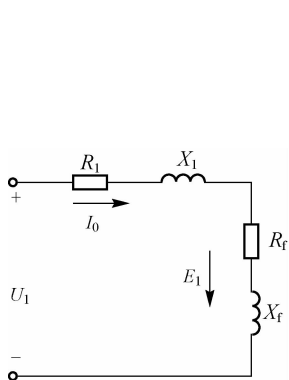


图 2-6 变压器空载等效电路

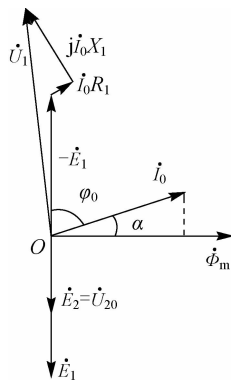


图 2-7 变压器空载时的相量图

作相量图时,以主磁通  $\dot{\Phi}_m$  为参考相量,画在横轴上; $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$  滞后主磁通  $\dot{\Phi}_m$   $90^\circ$ ;因为铁芯损耗的存在, $\dot{I}_0$  超前  $\dot{\Phi}_m$  一个铁耗角  $\alpha$ ;接着,在  $-\dot{E}_1$  的末端作电阻压降相量  $\dot{I}_0 R_1$  平行于  $\dot{I}_0$ ;然后在  $\dot{I}_0 R_1$  末端作漏抗压降  $j\dot{I}_0 X_1$ ,超前于  $\dot{I}_0$   $90^\circ$ ;  $j\dot{I}_0 X_1$  末端与原点  $O$  相接,即为相量  $\dot{U}_1$  (作图时各量可适当放大)。

### 学习情境三 单相变压器的负载运行

变压器的负载运行是指变压器的一次绕组接额定交流电压,而二次绕组接负载阻抗的运行方式。

#### 一、单相变压器负载运行时的电磁关系

如图 2-8 所示为单相变压器负载运行。

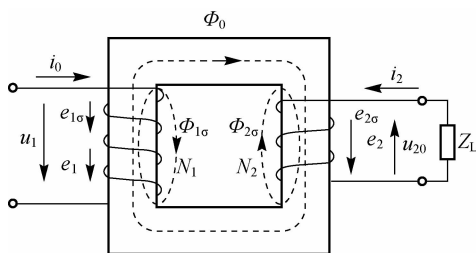


图 2-8 变压器负载运行

当变压器的二次绕组接负载阻抗  $Z_L$  时,在  $e_2$  的作用下,便有负载电流  $i_2$  流过二次绕组(其大小由负载阻抗的大小决定),并产生二次磁动势  $F_2 = N_2 i_2$ 。根据楞次定律,该磁动势试图削弱空载时的主磁通以及由主磁通感应的感应电动势  $e_1$ 。由于电源电压  $u_1$  不变, $e_1$  的减小会产生一个附加电流  $i_{1L}$ ,其增加的磁动势  $F_1 = N_1 i_{1L}$  恰好与二次磁动势  $N_2 i_2$  相抵消,从而保持磁通基本不变,使得电磁关系达到新的平衡。因此,负载时的主磁通由一、二次绕组的磁动势共同产生。

## 二、单相变压器负载运行时的基本方程式

### 1. 磁动势平衡方程

由上面的分析可知,变压器负载运行时产生主磁通的磁动势是由一次绕组磁动势  $F_1 = N_1 i_1$  和二次绕组磁动势  $F_2 = N_2 i_2$  两部分组成,所以合成磁动势可表示为  $F_1 + F_2$ 。由于主磁通的大小由电源电压  $u_1$  决定,因此,只要保证电源电压  $u_1$  不变,则产生的主磁通  $\Phi_0$  也应基本不变。因此,负载时建立主磁通所需的合成磁动势  $F_1 + F_2$  与空载时所需的磁动势  $F_0$  也应基本不变,即磁动势平衡方程为

$$\dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 \quad (2-19)$$

$$N_1 \dot{I}_0 = N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 \quad (2-20)$$

由式(2-20)可得

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 \quad (2-21)$$

式(2-21)表明,变压器负载运行时通过磁动势平衡,使一、二次绕组的电流紧密地联系在一起,一次绕组的电流随二次绕组电流的变化而变化,从而实现了电能从一次绕组到二次绕组的传递。

由于变压器在额定状态下运行时,励磁电流较小,故由式(2-21)可知,一次绕组与二次绕组的电流的有效值与匝数的关系为

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K} = K_i \quad (2-22)$$

式中, $K_i$  为变压器的电流比,即一次绕组电流和二次绕组电流的比值。

### 2. 电动势平衡方程

按照图 2-8 中的正方向,根据基尔霍夫第二定律,变压器在负载时的一、二次绕组的电动势平衡式为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_1 R_1 = -\dot{E}_1 + (R_1 + jX_1) \dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \quad (2-23)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{2\sigma} - \dot{I}_2 R_2 = \dot{E}_2 - (R_2 + jX_2) \dot{I}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \quad (2-24)$$

式中, $\dot{E}_{1\sigma}$  为一次侧漏磁电动势(V), $\dot{E}_{1\sigma} = -jX_1 \dot{I}_1$ ;  $\dot{E}_{2\sigma}$  为二次侧漏磁电动势(V), $\dot{E}_{2\sigma} = -jX_2 \dot{I}_2$ ;  $X_2$  为二次漏电抗( $\Omega$ );  $Z_2$  为二次漏阻抗( $\Omega$ ),  $Z_2 = R_2 + jX_2$ 。

变压器二次侧端电压也可写为

$$\dot{U}_2 = Z_L \dot{I}_2 \quad (2-25)$$

式中, $Z_L$  为负载阻抗( $\Omega$ )。

综上所述,变压器负载时的基本方程组为



$$\left. \begin{aligned} N_1 \dot{I}_0 &= N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 \\ \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \\ \dot{E}_1 &= -\dot{I}_0 Z_f \\ \frac{E_1}{E_2} &= \frac{N_1}{N_2} = K_u \\ \dot{U}_2 &= \dot{I}_2 Z_L \end{aligned} \right\} \quad (2-26)$$

### 三、变压器的绕组折算、等效电路及相量图

由前面的知识可知,变压器负载时的基本方程组反映了变压器内部的电磁关系,变压器的一、二次绕组之间是通过电磁耦合联系的,它们之间并无直接的电路联系,因此,利用基本方程式计算和分析变压器负载时的运行性能,就显得十分复杂,尤其在电压比  $K_u$  较大时,不仅计算十分繁琐,而且大大降低了精确度。为了便于分析和简化计算,引入与变压器负载运行时等效的纯电路模型,使其能够正确反映变压器内部的电磁关系,这种电路称为等效电路。采用绕组折算的方法就可得到这样的电路。

#### 1. 绕组折算

绕组折算就是将变压器的一、二次绕组折算成同样匝数,但不改变其电磁效应的计算过程。通常,用一个假想的绕组来代替其中一个绕组,使之成为电压比  $K_u = 1$  的变压器,假想绕组的磁动势与被替换绕组的磁动势相等。

绕组折算通常是将二次绕组折算到一次绕组,折算后的量在原来的符号上加一个上标号“'”以示区别,即取  $N'_2 = N_1$ ,则  $E_1$  变为  $E'_2$ 。折算后仅改变二次量的大小,并不改变其相位。

##### 1) 二次电动势和电压的折算

由于折算后变压器的主磁通不变,且一、二次绕组的匝数相同,因此,根据电动势与匝数成正比的关系,可得

$$\frac{E'_2}{E_2} = \frac{N'_2}{N_2} = \frac{N_1}{N_2} = K_u$$

即

$$E'_2 = K_u E_2 = E_1 \quad (2-27)$$

同理

$$\bar{E}'_{2\sigma} = K_u E_{2\sigma} \quad (2-28)$$

$$U'_2 = K_u U_2 \quad (2-29)$$

##### 2) 二次电流的折算

根据折算前后二次绕组磁动势不变的原则,可得

$$I'_2 N'_2 = I_2 N_2 \quad (2-30)$$

即

$$I'_2 = \frac{N_2}{N'_2} I_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = I_2 K_i \quad (2-31)$$

## 3) 二次漏阻抗的折算

根据折算前后消耗在二次绕组电阻及漏电抗上的有功、无功功率不变的原则,可得

$$I_2'^2 R_2' = I_2^2 R_2, \quad R_2' = \frac{I_2^2}{I_2'^2} R_2 = \frac{R_2}{K_1^2} \quad (2-32)$$

$$I_2'^2 X_2' = I_2^2 X_2, \quad X_2' = \frac{I_2^2}{I_2'^2} X_2 = \frac{X_2}{K_1^2} \quad (2-33)$$

## 4) 负载阻抗的折算

因为阻抗为电压与电流之比,所以有

$$Z_L' = \frac{U_2'}{I_2'} = \frac{K_u U_2}{K_i I_2} = K_u^2 \frac{U_2}{I_2} = K_u^2 Z_L \quad (2-34)$$

二次侧经过折算后,变压器的基本方程式变为

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= I_1 + I_2' \\ U_1 &= -E_1 + I_1 Z_1 \\ U_2' &= E_2' - I_2' Z_2' \\ E_1 &= -I_0 Z_f \\ E_1 &= E_2' \\ U_2' &= I_2' Z_L' \end{aligned} \right\} \quad (2-35)$$

## 2. 等效电路

## 1) T形等效电路

经过对二次绕组进行折算,可得到变压器负载运行时的等效电路,如图 2-9 所示。其中变压器一、二次绕组之间电磁耦合的作用,反映在由主磁通在绕组中产生的感应电动势  $E_1$  和  $E_2'$  上。

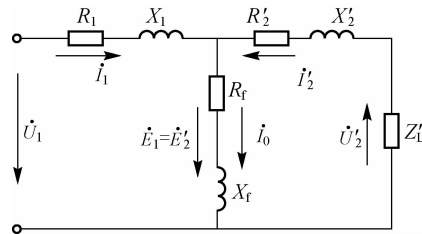


图 2-9 变压器的等效电路

在图 2-9 中,电阻  $R_1$  和  $R_2'$  消耗的电功率分别代表一、二次绕组中的铜损耗,励磁电阻  $R_f$  上消耗的电功率代表变压器的铁损耗,  $U_1 I_1$  为变压器的输入视在功率,  $U_2' I_2'$  为输出的视在功率。通过此电路可以看出变压器的一次侧和二次侧有了直接的电联系,并且将一次侧的视在功率传递给二次侧。

## 2) 近似等效电路

T形等效电路虽然能够正确反映变压器内部的电磁关系,但它的结构还是比较复杂,尤其是在进行复数计算时。由于  $Z_f \gg Z_1$ ,且当  $U_1$  不变时,  $I_0$  为常数,不受负载影响,所以可以把励磁支路从 T形等效电路中前移,如图 2-10 所示。同时,忽略励磁电流在一次绕组中产生的漏阻抗压降。由于电路近似  $\Gamma$ 形,故称其为  $\Gamma$ 形电路。

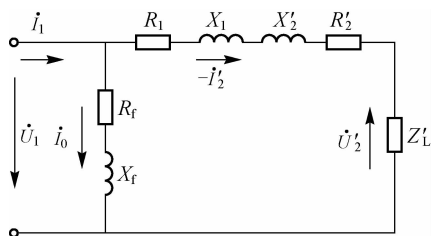


图 2-10 变压器的近似等效电路

### 3. 等效电路的简化

Γ形等效电路虽然正确反映了变压器内部的电磁关系,但它属于混联电路,进行复数运算比较麻烦。由于  $I_1 \gg I_0$ ,因此,完全可以把  $I_0$ 略去不计,更进一步简化等效电路图,从而得到一个更简单的阻抗串联的简化等效电路,如图 2-11 所示。

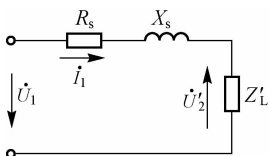


图 2-11 变压器的简化等效电路

在该电路中

$$\left. \begin{aligned} R_s &= R_1 + R'_2 \\ X_s &= X_1 + X'_2 \end{aligned} \right\} \quad (2-36)$$

式中,  $R_s$  为短路电阻( $\Omega$ );  $X_s$  为短路电抗( $\Omega$ )。

### 4. 相量图

根据变压器的 T 形等效电路可以得到其对应的相量图。用相量图不仅可以表明变压器负载运行时的电磁关系,而且还能直观地表示出变压器运行时各物理量的大小及相位关系。如图 2-12 所示为感性负载的相量图。

画相量图时,以折算后的负载端电压  $\dot{U}'_2$  作为参考量。首先,根据负载特性,画出折算后的负载电流  $\dot{I}'_2$ ,在相量  $\dot{U}'_2$  上加上折算后的二次侧阻抗压降  $\dot{I}'_2 R'_2$ 、 $j\dot{I}'_2 X'_2$ ,即得到折算后的二次侧电动势  $\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$ 。接着,由电磁感应定律可知,主磁通  $\dot{\Phi}_m$  超前于  $\dot{E}_1 90^\circ$ ,画出一  $\dot{E}_1$  和  $\dot{\Phi}_m$ ,由式  $\dot{I}_0 = -\dot{E}_1 / Z_f$  画出  $\dot{I}_0$ 。最后,由式  $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2$  画出  $\dot{I}_1$ ,在相量  $-\dot{E}_1$  上加上一次阻抗压降  $\dot{I}_1 R_1$ 、 $j\dot{I}_1 X_1$  画出  $\dot{U}_1$ ,这样就完成了相量图的绘制。图 2-12 中  $\varphi_1$  为一次侧功率因数角。

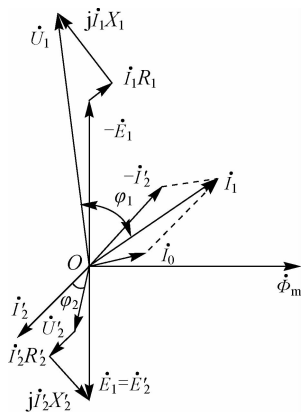


图 2-12 感性负载的相量图

## 四、变压器的效率及损耗

### 1. 变压器的效率

变压器在接入额定负载时,变压器的输出功率  $P_2$  与输入功率  $P_1$  的比值称为变压器的效率。用公式表示为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (2-37)$$

在实际情况下,由于变压器损耗的存在, $\eta$ 不可能达到100%。

## 2. 变压器的损耗

变压器的损耗主要由铜损耗和铁损耗两部分组成。

### 1) 铜损耗

变压器的绕组是用漆包线绕制的,由于导体存在着电阻,电流通过时,就会因发热而损耗一部分能量,这部分损耗的能量即为变压器的铜损耗。

### 2) 铁损耗

变压器的铁损耗包括涡流损耗和磁滞。变压器工作时,由于电流的大小和方向不断地变化,使铁芯内部分子相互摩擦产生热量,从而影响磁力线的变化,即产生磁滞。而且变压器工作时,铁芯中有磁力线通过,在磁力线平面垂直的方向产生感应电流,像一个小旋涡,使铁芯发热,消耗电能,这便是涡流损耗。为了减少铁损耗,变压器的铁芯采用导磁率高而磁滞小的软磁性材料制作(如硅含量为3%~4%的硅钢片等),同时,将这些材料做成薄片叠成铁芯,并使他们之间绝缘,以减少涡流损耗。

## 学习情境四 三相变压器

目前电力系统均采用三相制,因而三相变压器的应用极为广泛。三相变压器对称运行时,其各相的电压、电流大小相等,相位互差 $120^\circ$ 。因此,在运行原理的分析和计算时,可以取三相中的任意一相来研究,就其任意一相而言与单相变压器没有区别。前面导出的基本方程、等效电路等,可直接用于三相中的任意一相。本节主要研究三相变压器的磁路系统、三相变压器的接法。

### 一、三相变压器的磁路系统

三相变压器的磁路系统可分为组式磁路和心式磁路两类。

#### 1. 组式磁路

三相组式变压器是由三个单相变压器按一定方式组合而成的,如图2-13所示。由于每一相的主磁通 $\Phi$ 沿各自的磁路闭合,彼此之间不关联,因此,当一次侧加上三相对称电压时,三相主磁通必然对称,三相空载电流也是对称的。

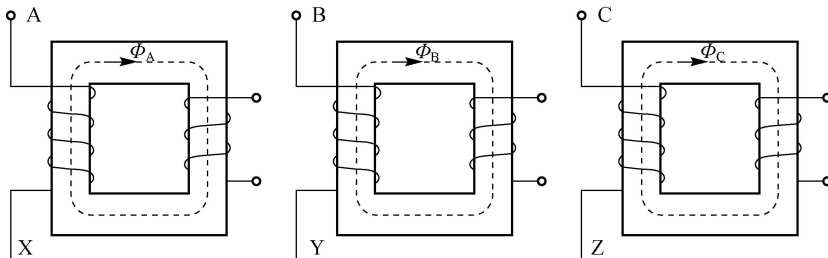


图 2-13 三相组式变压器的磁路系统





## 2. 心式磁路

三相心式变压器的每一相有一个铁芯柱,三个铁芯柱连接起来构成三相铁芯。三相心式变压器的磁路特点是各相磁路彼此相关,有电和磁的联系。根据电磁感应定律可知, $\Sigma\dot{\Phi}=\dot{\Phi}_A+\dot{\Phi}_B+\dot{\Phi}_C=0$ ,即中间铁芯柱的总磁通为零,所以可将其省去。

常用的三相心式变压器的铁芯结构如图 2-14 所示,因其三相磁路不对称,所以空载电流不相等。由于电力变压器的空载电流很小,它的不对称对变压器负载运行的影响很小,可以忽略不计,因此,空载电流取三相的平均值。

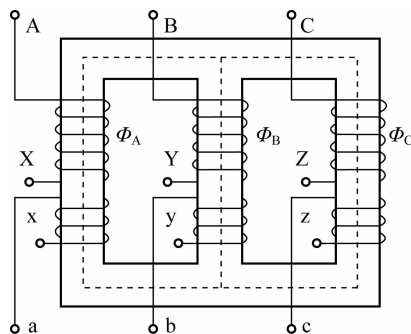


图 2-14 三相心式变压器的磁路系统

## 二、三相变压器的接法

### 1. 同名端的判别

当磁通  $\Phi$  交变时,在任一瞬间,高压绕组的某一端点的电位相对为正时,低压绕组必有一端点的电位也相对为正,这两个对应的端点就称为同名端,通常在对应的端点旁用“\*”或“·”表示,如图 2-15 所示。图 2-15(a)中 A 与 a 为同名端,图 2-15(b)中 A 与 x 为同名端。

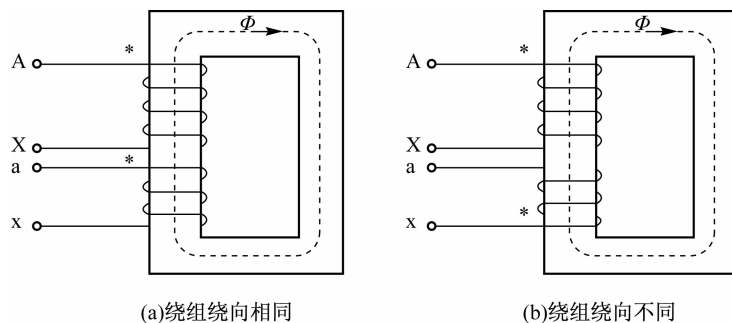


图 2-15 变压器绕组的同名端

常用的判别变压器同名端的方法有观察法、直流法和交流法 3 种。

#### 1) 观察法

观察法是利用楞次定律、安培定则来判别变压器同名端。当变压器一次侧开关合上的瞬间,一次绕组电流  $i_1$  产生主磁通,在一次绕组产生自感电动势  $e_1$ ,在二次绕组产生互感电动势  $e_2$  和感应电流  $i_2$ 。用楞次定律可以确定  $e_1$ 、 $e_2$ 、 $i_2$  的实际方向,同样可以确定  $U_1$ 、 $U_2$  的实际方向。若一次绕组的一端与二次绕组的一端电位相同,即为同名端。

### 2) 直流法

将变压器与 1.5 V 或 3 V 的直流电源连接,如图 2-16 所示。将万用表置于直流电压 2.5 V 挡,红表笔接 C 端,黑表笔接 D 端,闭合开关 K。在开关闭合的瞬间有变化的电流流过变压器的一次绕组,仔细观察万用表指针,可以看到指针的摆动方向。如果指针向右正向摆动,并迅速摆回原处,说明 C 点和 A 点是同名端,D 点和 B 点是同名端。若闭合开关 K 时,万用表指针向左反向摆动,则 C 点和 B 点是同名端,D 点和 A 点是同名端。

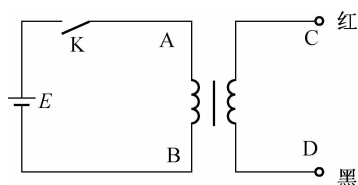


图 2-16 直流法判别变压器同名端

### 3) 交流法

用导线将高压绕组的一端与低压绕组的一端相连,同时将高压绕组及低压绕组的另一端接交流电压表 V1,再将高压绕组两端接入低压交流电源,如图 2-17 所示。测量  $U_1$ 、 $U_2$  的值,若  $U_1 < U_2$ ,则 A、a 为同名端;若  $U_1 > U_2$ ,则 A、b 为同名端。

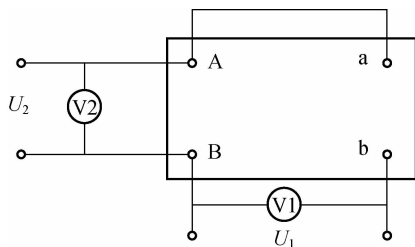


图 2-17 交流法判别变压器同名端

## 2. 三相变压器绕组的接法

在三相变压器中,绕组主要采用星形联结和三角形联结。绕组首末端的标记见表 2-1。

表 2-1 绕组首端和末端的标记

绕组名称	首 端	末 端	中 点
高压线圈	A, B, C	X, Y, Z	N
低压线圈	a, b, c	x, y, z	n

星形联结是指把三相绕组的 3 个末端接在一起,而把首端引出分别接三相电源,形状像字母“Y”,用字母 Y 或 y 表示。其接法分为有中线和无中线两种,如图 2-18 所示。

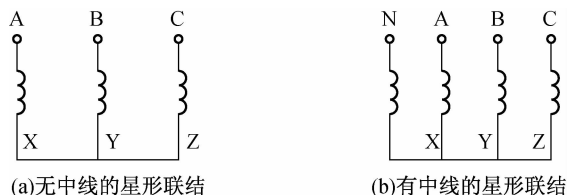


图 2-18 三相绕组星形联结

三角形联结是指把一相的末端和另一相的首端相连,使其三相绕组首尾相连,首端接三相电源,形成一个“△”形,用字母 D 或 d 表示。其接法分为顺序联结和逆序联结两种,如图 2-19 所示。

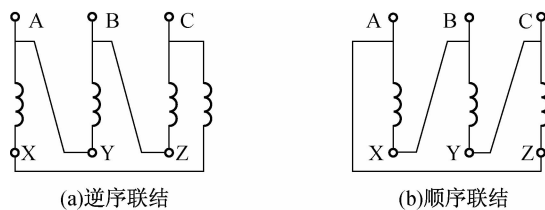


图 2-19 三相绕组三角形联结

### 3. 三相变压器的联结组别

变压器使用不同的接法时,一次绕组和二次绕组对应的线电压之间可以形成不同的相位。为了简单明了地表达绕组不同接法与对应线电压之间的相位关系,将变压器一、二次绕组分成的不同组联结称为绕组的联结组。理论和实践证明,不论三相绕组采用什么联结方法,一、二次侧线电压的相位总是相差  $30^\circ$  的整数倍。

为了表明高、低压侧线电压之间的相位关系,通常采用时钟表示法,即把高、低压绕组两个线电压三角形的重心重合,把高压侧线电压三角形的一条中线作为时钟的长针,指向钟面的 12,再把低压侧线电压三角形中对应的中线作为短针,它所指的钟点就是该联结组的组号。

联结组的组号可以根据高、低压绕组的同名端和绕组的接法来确定。下面以  $Yy0$  和  $Yd11$  这两种联结组为例,说明其接法。

#### 1) $Yy0$

如图 2-20 所示为三相变压器  $Yy0$  联结组及相位图。此时一、二次绕组绕向相同,故 A 和 a 为同名端,同理 B 和 b、C 和 c 亦是同名端。由于一、二次绕组的首端为同名端,故一、二次绕组对应的相电压同相位。相应地,一、二次绕组对应的线电压也同相位。

如果把低压边的非同名端标为首端 a、b、c,再把末端 x、y、z 连接在一起,首端 a、b、c 引出,联结组将变成  $Yy6$ 。

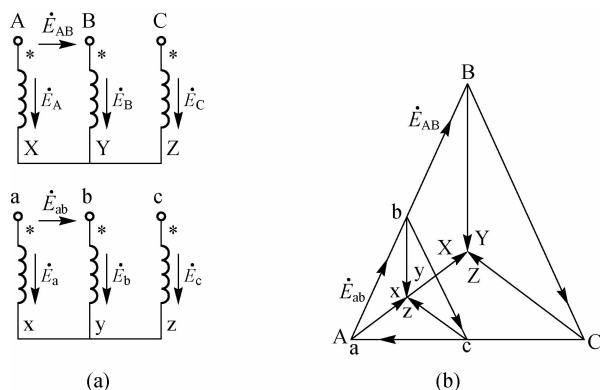


图 2-20 三相变压器  $Yy0$  联结图及相位图

## 2) Yd11

如图 2-21 所示为三相变压器 Yd11 联结图及相位图。此时把一、二次绕组的首端作为同名端,故一、二次绕组对应的相电压为同相位,二次绕组依次联结成三角形。

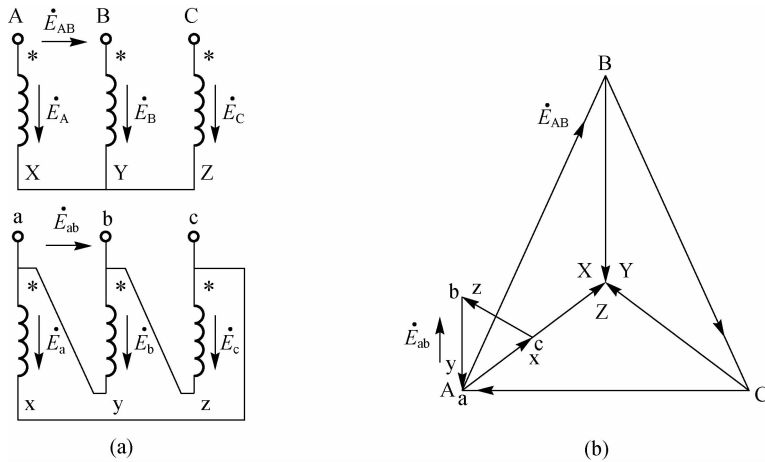


图 2-21 三相变压器 Yd11 联结图及相位图

## 学习情境五 其他用途的变压器

随着工业的不断发展,除了传输能量的双绕组电力变压器外,尚有多种特殊用途的变压器,它们虽然结构与外形不尽相同,但基本原理完全一样,本节简要介绍常用的自耦变压器和仪用互感器。

### 一、自耦变压器

自耦变压器也称为调压器,是实验室常用的一种变压器。它只有一个绕组,这个绕组既是一次绕组,也是二次绕组,故称为公共绕组。一、二次绕组之间既有磁的关联,又有电的直接联系。由于两边有直接的电联系,因此,36 V 以下也不一定是安全电压。其原理如图 2-22 所示。

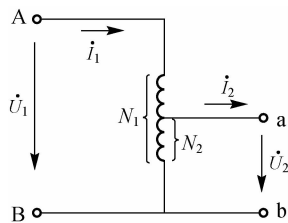


图 2-22 自耦变压器的原理图

当一次侧加电压时,由于主磁通作用,在一、二次侧产生感应电动势,其有效值为

$$E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$$

$$E_2 = 4.44fN_2\Phi_m$$

如不考虑漏阻抗,则自耦变压器的电压比为



$$K_u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

自耦变压器的绕组容量小于额定容量,当额定容量相同时,自耦变压器与双绕组变压器相比,其单位容量所消耗的材料少,变压器的体积小,造价低,铜损耗和铁损耗小,因而效率高。自耦变压器负载还可以直接从电源吸收部分功率。

自耦变压器的主要缺点是绕组公共部分电流小于额定电流,电压比  $K_u$  不能太大,一般  $K_u < 3$ 。

## 二、仪用互感器

仪用互感器是电力系统中常用的测量设备,互感器与电压表或电流表配合可测量高电压或大电流,使用时测量回路与被测回路隔离,以保障工作人员和测试设备的安全;还可为各类继电保护的控制系统提供控制信号。

仪用互感器分为电流互感器与电压互感器两种,它们是常用的两种特殊变压器,工作原理与普通变压器基本相同。

### 1. 电流互感器

电流互感器类似于一个升压变压器,它的一次绕组匝数很少,一般只有一匝到几匝,而二次绕组匝数却比较多,如图 2-23 所示。

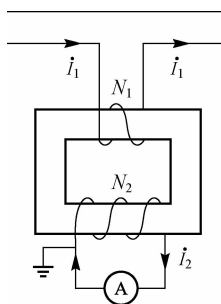


图 2-23 电流互感器原理图

由于电流互感器的二次绕组接入的仪表内阻很小,二次侧相当于短路,因此,电流互感器的运行情况可近似看成是变压器的短路运行情况。为了减小误差,铁芯中的磁通密度很低,一般在  $0.05 \sim 0.10 \text{ T}$  的范围内,所以励磁电流很小。若忽略励磁电流,由磁动势平衡方程式,可得电流互感器的电流变比为

$$K_i = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

即

$$I_2 = \frac{I_1}{K_i} \quad (2-38)$$

式中,  $K_i$  称为电流比,是个常数。

通常,电流互感器的二次侧额定电流均设计为  $5 \text{ A}$ , 额定电流等级有  $100 \text{ A}/5 \text{ A}$ 、 $500 \text{ A}/5 \text{ A}$ 、 $2000 \text{ A}/5 \text{ A}$  等,精度等级分为  $0.2$ 、 $0.5$ 、 $1.0$ 、 $3.0$  和  $10.0$  这 5 个等级。

电流互感器在使用时应注意以下几点:

(1) 在运行过程中绝对不允许二次侧开路。电流互感器的二次侧若开路,则一次侧电流

全部成为励磁电流,铁芯中的磁通增大,铁芯过分饱和,铁损耗急剧增大,引起互感器发热。

(2)因为二次绕组匝数较多,将会感应出高电压,所以一定要有保护措施保证操作人员和测量设备的安全。

(3)为了使用安全,二次绕组必须可靠接地。

(4)二次侧回路的阻抗不应超过规定值,以免增大误差。

## 2. 电压互感器

电压互感器实质上是一个降压变压器,主要用于测量高压线路的电压,其工作原理和结构与双绕组变压器基本相同。一次侧直接并联在被测高压电路上,二次侧接电压表或功率表,电压互感器原理如图 2-24 所示。

由于电压互感器的二次绕组所接入的仪表阻抗很大,二次电流很小,近似为零,因此,电压互感器的运行情况可近似看成是变压器的空载运行情况。由变压器的工作原理,可得电压互感器的电压比为

$$K_u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

即

$$U_2 = \frac{U_1}{K_u}$$

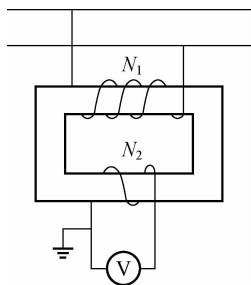


图 2-24 电压互感器原理图

由式(2-11)可知,当电压互感器的一、二次绕组匝数不同时,可将被测的高电压转换成低电压测量。通常,二次侧的额定电压设计为 100 V,额定等级有 3 000 V/100 V、10 000 V/100 V等。

电压互感器在使用时应注意以下几点:

- (1)二次侧不允许短路,否则会产生很大的短路电流,烧坏互感器的绕组。
- (2)为了使用安全,二次绕组必须可靠接地。
- (3)二次侧回路的阻抗不得小于规定值,以减小误差。
- (4)接线时要注意端子的极性是否连接正确。



## 技能训练

# 单相变压器的参数测定

变压器等效电路中的绕组电阻、漏电抗及励磁阻抗等都是变压器的参数,它们对变压器运行性能有直接的影响。要用基本方程式、等效电路或相量图分析和计算变压器的运行性能,必须先确定其参数。对于一台已制成的变压器,只有通过试验的方法来求取各个参数。一般可以通过空载试验和短路试验来确定变压器的参数。

## 一、空载试验

### 1) 实训目的

- (1)学习单相变压器的空载参数测定方法。



(2)利用单相变压器的空载试验测定单相变压器的参数,如空载电流  $I_0$ 、空载损耗  $P_0$ 、一次侧电压  $U_1$ 、变比  $K$  等。

2)实训仪器和仪表

功率表、调压器、电压表、交流毫安表。

3)实训方法和步骤

(1)空载试验一般在低压侧进行,即低压端接电源,高压端开路。

(2)按照如图 2-25 所示的变压器空载试验电路图连接电路。

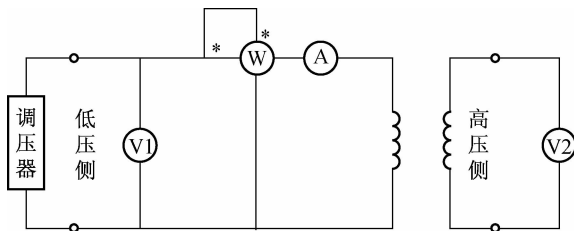


图 2-25 变压器空载试验电路

(3)调节调压器电压,观察电压表 V1,使其逐渐升高到变压器额定电压的 50%。

(4)读取电压表 V1、V2 的值,并做好记录,计算出变压器的变比  $K(K=U_1/U_2)$ 。

(5)继续逐渐升高电压至  $1.2U_N$ ,然后逐渐降低电压,每次测量空载电压  $U_1$ 、空载电流  $I_0$  及空载损耗  $P_0$ ,在  $(0\sim 1.2)U_N$  范围内变化外加电压,读取 6~7 组数据,记录在表 2-2 中。

表 2-2 单相变压器参数的测量数据 1

室温: \_\_\_\_\_ °C

序 号	试验数据			计算数据		
	$U_1/V$	$I_0/A$	$P_0/W$	$U'_1/V$	$I'_0/A$	$\cos \varphi$

注: $U'_1=U_1/U_N, I'_0=I_0/I_N, \cos \varphi=P_0/U_1 I_0$ 。

单相变压器空载运行时,由于空载电流  $I_0$  很小,绕组损耗很小,因此,认为单相变压器空载时的输入功率  $P_0$  完全用来平衡变压器的铁损耗,即  $P_0 \approx \Delta P_{Fe}$ 。

测量单相变压器的空载参数时应当注意:

- (1)空载试验在任何一侧做均可,高压侧参数是低压侧的  $K^2$  倍。
- (2)由于功率因数很低,为减小误差,应使用低功率因数的功率表。

## 二、短路试验

### 1)实训目的

(1)学习单相变压器的短路参数的测定方法。

(2)利用单相变压器的短路试验测定单相变压器的参数,如短路电流  $I_s$ 、短路功率  $P_s$  和

短路电压  $U_s$ 。

2) 实训仪器和仪表

功率表、调压器、电压表、交流毫安表。

3) 实训方法和步骤

(1) 短路试验一般在高压侧加压, 低压侧短路。

(2) 按照如图 2-26 所示的变压器短路试验电路图连接电路。

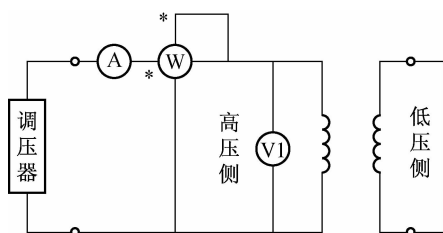


图 2-26 变压器短路试验电路

(3) 为避免出现过大的短路电流, 在接通电源之前, 必须先将调压器调至输出电压为零的位置。

(4) 合上电源开关, 稍加一个低电压, 检查各仪表正常后, 观察电流表的读数并缓慢地逐渐增加电压, 使短路电流升高至  $1.3I_N$  左右。然后逐次降低电压, 使电流降至零, 即在  $(0 \sim 1.3)I_N$  范围内变化。测量电流  $I_s$ 、功率  $P_s$  和电压  $U_s$ , 读取 5~6 组数据记录在表 2-3 中。

表 2-3 单相变压器参数的测量数据 2

室温: \_\_\_\_\_ °C

序 号	试验数据			计算数据		
	$U_s/V$	$I_s/A$	$P_s/W$	$U'_s/V$	$I'_s/A$	$\cos \varphi$

注:  $U'_s = U_s/U_N$ ,  $I'_s = I_s/I_N$ ,  $\cos \varphi = P_s/U_s I_s$ 。

由于短路试验时外加电压远远低于额定电压, 主磁通很小, 因此, 铁损耗和励磁电流均可忽略不计, 并认为输入的短路功率  $P_s$  即为铜损耗  $P_{Cu}$ , 即  $P_s \approx P_{Cu}$ 。

测量单相变压器的短路参数时应当注意:

- (1) 电力变压器短路电压约为额定电压的 10% 左右, 依此范围选择电压表量程。
- (2) 选用功率因数为 1 的功率表。
- (3) 电源接变压器的高压侧, 低压侧短路。



### 单元练习

1. 为什么在电能的传输中要用到变压器?
2. 变压器的工作原理是什么? 它的主要组成部分是什么?





3. 已知一台变压器  $S_N=560 \text{ kV}\cdot\text{A}$ ,  $U_{1N}/U_{2N}=3\ 000 \text{ V}/100 \text{ V}$ , 求一、二次绕组的额定电流各是多大?
4. 变压器空载时, 一侧加额定电压, 虽然线圈(铜损耗)电阻很小, 但是电流仍然很小, 为什么?
5. 变压器有哪几种损耗? 各与哪些因素有关? 在什么情况下变压器效率最高?
6. 变压器空载试验和负载试验的主要目的和步骤是什么?
7. 如何判断三相变压器的绕组是星形联结还是三角形联结?
8. 绘出变压器 T 形等效电路, 并说明各参数的含义。
9. 试说明磁动势平衡方程式在分析变压器中的作用。
10. 电压互感器和电流互感器各有什么作用? 使用时应注意什么?
11. 变压器的额定电压为  $220 \text{ V}/110 \text{ V}$ , 若不慎将低压侧误接到  $220 \text{ V}$  电源上, 试问励磁电流将会发生什么变化? 变压器将会出现什么现象?

## 单元三

# 三相异步电动机

### 知识目标

掌握三相异步电动机的基本结构和工作原理；  
掌握三相异步电动机的电磁关系及等效电路；  
掌握三相异步电动机的工作特性和机械特性；  
掌握三相异步电动机的启动、制动和调速的方法。

### 技能目标

能正确测定三相异步电动机的参数；  
会利用三相异步电动机的等效电路进行工程分析和计算。

### 单元导读

交流电机可分为同步电机和异步电机两大类，异步电机是指运行时转子转速与旋转磁场的转速不同步的电机。异步电机主要用做电动机，来拖动各种生产机械。由于其具有结构简单、使用方便、效率高等优点，在工业生产、农业机械化、民用电器等方面应用广泛。

### 相关知识

## 学习情境一 三相异步电动机的基本知识

### 一、三相异步电动机的基本结构

三相异步电动机的结构和直流电动机基本相似，主要由定子和转子两大部分组成，在定子与转子之间有一定的气隙，如图 3-1 所示为笼型三相异步电动机的结构。

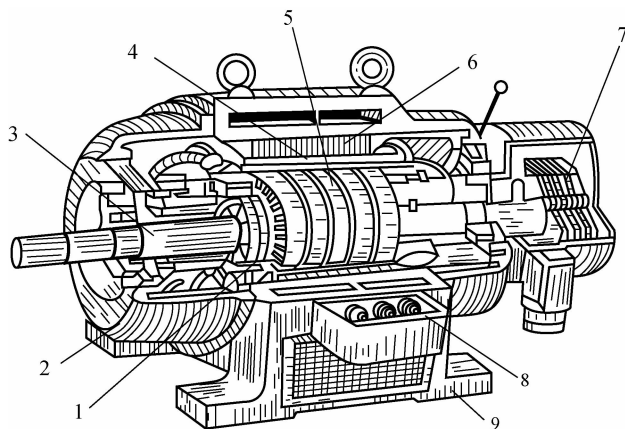


图 3-1 笼型三相异步电动机的结构

1—转子绕组；2—端盖；3—转轴；4—定子绕组；5—转子铁芯；  
6—定子铁芯；7—集电环；8—接线盒；9—机座

## 1. 定子部分

异步电动机的定子主要由定子铁芯、定子绕组和机座等组成。

### 1) 定子铁芯

定子铁芯是异步电动机主磁通磁路的一部分，装在机座里。为了减少铁损耗，定子铁芯一般由导磁性能很好的硅钢片叠压而成，厚约 0.35~0.5 mm，硅钢片的两面涂有绝缘漆。如图 3-2 所示为三相异步电动机定子铁芯。

在定子铁芯的内圆上开有槽，称为定子槽，其主要用来放置和固定定子绕组，如图 3-3 所示为定子槽。其中图 3-3(a)为开口槽，用于大、中型高压异步电动机中；图 3-3(b)为半开口槽，可以嵌放成形线圈，主要用于大型低压异步电动机中；图 3-3(c)为半闭口槽，从提高电动机的效率和功率因数角度看，半闭口槽最好，但其工艺比较复杂，主要用于小型低压异步电动机中。

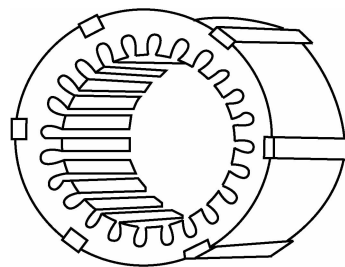


图 3-2 三相异步电动机定子铁芯

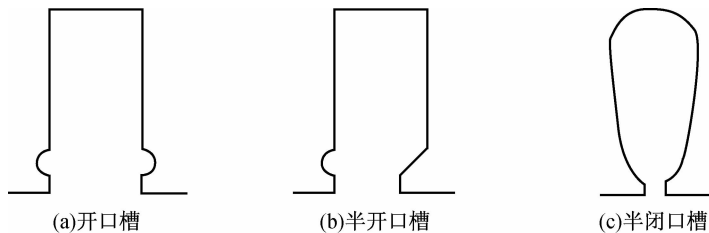


图 3-3 定子槽

### 2) 定子绕组

定子绕组是异步电动机的电路部分，它由许多线圈按一定规律连接起来，放置在定子槽内。定子绕组分为单层绕组和双层绕组。一般大型的异步电动机采用双层绕组，中、小型异步电动机采用单层绕组。

### 3) 机座

机座的主要作用是固定和支撑定子铁芯,因此,机座应有足够的机械强度和刚度。中、小型异步电动机一般采用铸铁机座,大型异步电动机一般采用钢板焊接的机座。

## 2. 转子部分

异步电动机的转子主要由转子铁芯、转子绕组和转轴 3 部分组成。

### 1) 转子铁芯

转子铁芯也是电动机主磁通磁路的一部分,它由 0.35~0.5 mm 厚的硅钢片叠压而成。整个铁芯固定在转轴或转子支架上。

### 2) 转子绕组

一般情况下,异步电动机的转子绕组分为笼型和绕线型两种。

在转子的每个槽里放入一根铁芯,铁芯的两端各用一个集电环连接起来,形成一个短路绕组,即为笼型转子。如果去掉转子铁芯,剩下的绕组形状像个松鼠笼子,如图 3-4 所示,因此,又称为鼠笼转子。

绕线型转子绕组与定子绕组相似,它是嵌放在转子铁芯的槽内的用绝缘导线组成的三相绕组,一般都联结成星形。3 条导线分别接到 3 个滑环上,用一套电刷装置引出来,如图 3-5 所示。

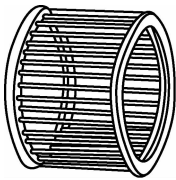


图 3-4 笼型转子绕组

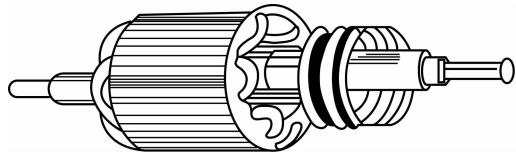


图 3-5 绕线型转子

## 3. 气隙

异步电动机定子与转子之间的空气间隙简称为气隙,异步电动机的气隙比同容量直流电动机的气隙小得多。在中、小型异步电动机中,气隙一般为 0.2~1.5 mm 左右。

异步电动机的励磁电流是由电网供给的。气隙的变化通常会使励磁电流变化,从而影响电动机的功率因数。一般情况下,异步电动机的气隙大小往往为机械条件允许的最小数值。

## 二、三相异步电动机的基本工作原理

### 1. 旋转磁场的产生

旋转磁场是指极性与大小不变,且沿着一定方向以一定速度旋转的磁场。当对称三相绕组中通入对称的三相电流时,便会产生旋转磁场。三相绕组 U、V、W 接到对称三相电源上,则定子绕组中会产生三相对称的电流,各相电流的瞬时表达式为

$$i_U = I_m \cos \omega t$$

$$i_V = I_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

$$i_W = I_m \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

三相对称的电流随时间的变化是连续的,如图 3-6 所示。为了分析方便,可以选定



$\omega t=0$ 、 $\omega t=2\pi/3$ 、 $\omega t=4\pi/3$ 、 $\omega t=2\pi$  等几个特定的时刻来分析。规定电流从绕组首端流入为正,末端流入为负。电流的流入用符号 $\otimes$ 表示,流出用符号 $\odot$ 表示。

当  $\omega t=0$  时,U 相电流为正,电流从首端 U1 流入,从末端 U2 流出;V、W 相电流为负,电流从末端 V2、W2 流入,从首端 V1、W1 流出,如图 3-7(a)所示。合成磁场的轴线位于 U 相绕组的轴线上。

当  $\omega t=2\pi/3$  时,V 相电流为正,电流从首端 V1 流入,从末端 V2 流出;U、W 相电流为负,电流从末端 U2、W2 流入,从首端 U1、W1 流出,如图 3-7(b)所示。此时,合成磁场的轴线位于 V 相绕组的轴线上,磁场方向沿逆时针旋转了  $120^\circ$ 。

当  $\omega t=4\pi/3$  时,W 相电流为正,电流从首端 W1 流入,从末端 W2 流出;U、V 相电流为负,电流从末端 U2、V2 流入,从首端 U1、V1 流出,如图 3-7(c)所示。此时,合成磁场的轴线位于 W 相绕组的轴线上,磁场方向沿逆时针旋转了  $240^\circ$ 。

当  $\omega t=2\pi$  时,磁场方向正好旋转一周,如图 3-7(d)所示,合成磁场的轴线正好位于 U 相绕组的轴线上。

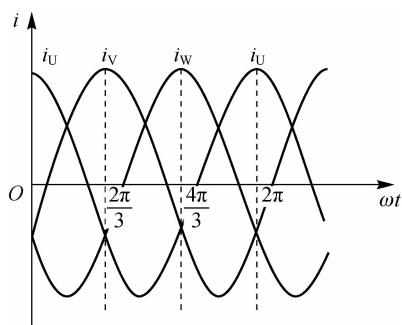


图 3-6 三相对称电流的波形

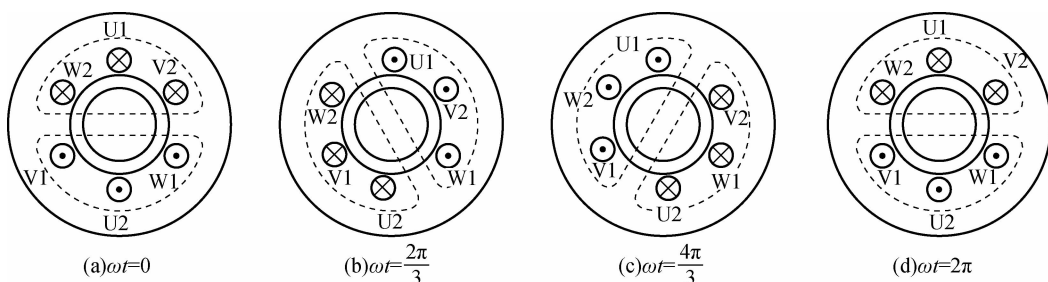


图 3-7 旋转磁场示意图

由上面分析可知,旋转磁场的转速  $n_1$ 、电网的频率  $f_1$  及电动机的极对数  $p$  的关系为

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (3-1)$$

旋转磁场的转速  $n_1$  又称为同步转速。

## 2. 基本工作原理

当三相异步电动机的定子绕组通入三相对称的电流时,便在定子、转子之间的气隙中产生旋转磁场。设旋转磁场以  $n_1$  的速度顺时针旋转,转子铁芯逆时针方向切割磁力线,产生感应电动势。感应电动势的方向可根据右手定则判定。转子电路为闭合电路,在感应电动势的作用下,产生感应电流。载流导体在磁场中要受到力的作用,其方向可以用左手定则判定,这些电磁力对转轴形成一个电磁转矩,其作用方向同旋转磁场的旋转方向一致。这样,转子便以一定的速度沿旋转磁场的旋转方向转动起来,因为转子的转动速度总是与磁场的旋转速度有差异,所以称为异步电动机。由于电磁感应的关系,在转子绕组中产生电动势、电流,从而产生电磁转矩,所以异步电动机又称为感应电动机。

### 3. 转差率

通常把同步转速  $n_1$  和电动机转子转速  $n$  两者之差与同步转速  $n_1$  的比值称为转差率, 又称为转差或滑差, 用  $s$  表示, 即

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (3-2)$$

转差率是一个没有单位的物理量, 它的大小反映了电动机的各种运行情况。对于异步电动机而言, 当  $n=0$  时,  $s=1$ , 此刻电动机转子还未转动, 为启动瞬间; 当  $n \approx n_1$  时,  $s \approx 0$ , 此刻电动机转子转速接近同步转速。对于普通的三相异步电动机, 为了提高效率, 经常设计成转子转速  $n$  略低于但很接近同步转速  $n_1$ , 正常运行时, 转差率一般在  $0.01 \sim 0.05$  之间。

**例 3-1** 某三相异步电动机的额定转速为  $570 \text{ r/min}$ ,  $f_1 = 50 \text{ Hz}$ 。求电动机的极对数和额定负载时的转差率。

**解** 由于电动机的额定转速应接近且略小于同步转速, 显然与  $570 \text{ r/min}$  最接近的是  $600 \text{ r/min}$ 。因此, 可确定  $n_1 = 600 \text{ r/min}$ 。

由式  $n_1 = \frac{60f_1}{p}$  可知

$$p = \frac{60f_1}{n_1} = \frac{60 \times 50}{600} = 5$$

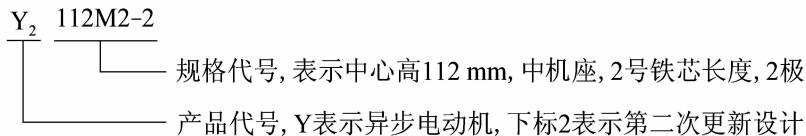
$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{600 - 570}{600} = 5\%$$

## 三、三相异步电动机的铭牌数据

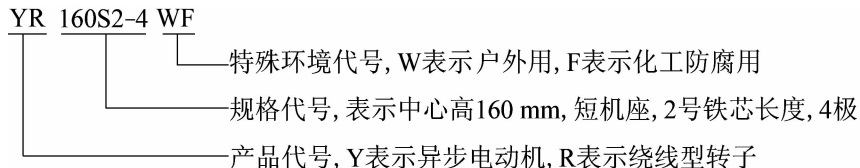
### 1. 型号

三相异步电动机的型号一般由大写的汉语拼音字母和阿拉伯数字组成。其中汉语拼音字母是根据三相异步电动机的全称选择有代表意义的汉字, 再用该汉字的第一个拼音字母组成。如 Y 表示异步电动机, YR 表示绕线型异步电动机等。下面分别举例说明中、小型异步电动机和大型异步电动机的型号。

中、小型异步电动机:



大型异步电动机:



### 2. 额定值

和其他电机一样, 三相异步电动机的机座上也有一个铭牌, 上面标注着电动机正常运行



状态下的额定数据,即额定值。

#### 1) 额定电压

额定电压是指电动机在额定状态下运行时,允许加在定子绕组两端的线电压值,常用  $U_N$  表示,单位为 V 或 kV。

#### 2) 额定电流

额定电流是指电动机在额定状态下运行时,定子绕组中允许通过的线电流值,常用  $I_N$  表示,单位为 A。

#### 3) 额定效率

额定效率是指电动机在额定状态下运行时,额定输出功率  $P_2$  与额定输入功率  $P_1$  的比值,用  $\eta_N$  表示,即

$$\eta_N = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{\sqrt{3}U_N I_N \cos \varphi} \times 100\%$$

式中,  $\cos \varphi$  为功率因数。

电动机空载时效率很低,满载或接近满载时效率最高,一般为 75%~92%。

#### 4) 额定功率

额定功率是指电动机在额定运行时,转子轴上输出的机械功率,常用  $P_N$  表示,单位为 W 或 kW。对于三相异步电动机,其额定功率为

$$P_N = \sqrt{3}U_N I_N \eta_N \cos \varphi_N$$

式中,  $\cos \varphi_N$  为异步电动机的额定功率因数。

#### 5) 额定频率

额定频率是指电动机所接交流电源的频率,常用  $f_N$  表示,单位为 Hz。我国电网的频率为 50 Hz。

#### 6) 额定转速

额定转速是指电动机在额定状态下运行时的转子转速,常用  $n_N$  表示,单位为 r/min。

## 四、三相异步电动机的特点与分类

### 1. 三相异步电动机的特点

三相异步电动机的主要优点是结构简单,制造容易,价格低廉,运行可靠,坚固耐用,运行效率较高;三相异步电动机的主要缺点是功率因数较低,通常总是小于 1,启动和调速性能差。

### 2. 三相异步电动机的分类

三相异步电动机的种类很多,从不同的角度考虑,有不同的分类方法。按转子结构可分为绕线型三相异步电动机和笼型三相异步电动机,其中笼型三相异步电动机又包括单鼠笼三相异步电动机、双鼠笼三相异步电动机和深槽式异步电动机;按有无换向器可分为无换向器三相异步电动机和换向器三相异步电动机;根据电动机定子绕组上所加电压大小可分为高压三相异步电动机和低压三相异步电动机。

## 学习情境二 三相异步电动机的电磁关系

### 一、三相异步电动机的磁动势

由前面的介绍可知,在三相异步电动机中,实现能量转换的前提是有旋转磁场存在。这种旋转磁场是由三相对称电流产生的磁动势建立的,此磁动势是总磁动势。总磁动势分为定子磁动势和转子磁动势两种。

#### 1. 定子磁动势

当三相异步电动机定子的三相对称绕组接到三相对称的电源上时,定子所产生的磁动势  $F_1$  是圆形旋转磁动势,其表达式为

$$\left. \begin{aligned} F_1(x, t) &= F_{1m} \cos\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right) \\ F_{1m} &= \frac{3}{2} \times 0.9 \times \frac{N_1 K_{w1}}{p_1} I_1 \end{aligned} \right\} \quad (3-3)$$

式中,  $N_1$  为定子一相绕组串联的匝数;  $K_{w1}$  为定子绕组的系数;  $p_1$  为定子极对数;  $I_1$  为定子绕组电流的有效值(A);  $F_{1m}$  为幅值。

#### 2. 转子磁动势

当转子的三相绕组中流过三相对称的电流时,也会产生磁动势  $F_2$ ,这个磁动势也是旋转磁动势。假设电动机以转速  $n$  旋转时,转子电流产生的三相合成旋转磁场的幅值为

$$F_{2m} = \frac{3}{2} \times 0.9 \times \frac{N_2 K_{w2}}{p_2} I_2 \quad (3-4)$$

式中,  $N_2$  为转子一相绕组串联的匝数;  $K_{w2}$  为转子绕组的系数;  $p_2$  为转子极对数;  $I_2$  为转子绕组电流的有效值(A)。

假设异步电动机带负载时,转子转速为  $n$ ,同步转速为  $n_1$ ,则转子绕组中感应电动势及电流的频率为

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n)}{60} = \frac{pn_1}{60} \times \frac{n_1 - n}{n_1} = sf_1 \quad (3-5)$$

式中,  $f_2$  为转子绕组中感应电动势及电流的频率(Hz)。

#### 3. 合成磁动势

由于作用在三相异步电动机上的定子磁动势  $F_1$  和转子磁动势  $F_2$  以相同的转速旋转,根据三相异步电动机定子、转子磁动势的矢量关系,可用矢量叠加的方法合成,得到一个合成磁动势  $F$ 。其合成磁动势可以表示为

$$\dot{F} = \dot{F}_1 + \dot{F}_2$$

由上面的分析可知,当三相异步电动机转子以转速  $n$  旋转时,定子、转子的磁动势关系并没有改变,只是各自数值大小和相互间的相位不同。



## 二、三相异步电动机的感应电动势

由于主磁通  $\Phi_m$  与定子绕组和转子绕组相交链,因此,分别在定子绕组和转子绕组中感应出对称的定子电动势  $\dot{E}_1$  和转子电动势  $\dot{E}_{2s}$ ,其有效值分别为

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= 4.44f_1 N_1 K_{w1} \Phi_m \\ E_{2s} &= 4.44sf_1 N_2 K_{w2} \Phi_m \end{aligned} \right\} \quad (3-6)$$

而定子电动势  $\dot{E}_1$  和转子电动势  $\dot{E}_{2s}$  在相位上都滞后于主磁通  $\dot{\Phi}_m 90^\circ$ ,所以  $\dot{E}_1$  和  $\dot{E}_{2s}$  的相量表达式分别为

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_1 &= -j4.44f_1 N_1 K_{w1} \dot{\Phi}_m \\ \dot{E}_{2s} &= -j4.44sf_1 N_2 K_{w2} \dot{\Phi}_m \end{aligned} \right\} \quad (3-7)$$

## 学习情境三 三相异步电动机的等效电路与相量图

三相异步电动机的定子、转子绕组与变压器的一、二次绕组基本一样,两者之间只有磁的耦合而无直接电的联系。在分析异步电动机时,可以采用与变压器相似的方法,在不改变定子绕组的特性和电动机的电磁性能条件下,可以将转子绕组先进行折算,然后将折算后的转子绕组和定子绕组直接联系起来得到等效电路,从而简化分析和计算。

### 一、三相异步电动机的等效折算

#### 1. 频率折算

频率折算的主要目的是用一个等效的静止转子电路代替实际旋转的转子系统,使等效转子电路与定子电路具有相同的频率。由前面的分析可知,只有当转子静止时,两者才具有相同的频率。因此,频率折算就是用静止的转子来等效代替旋转的转子。

在折算的过程中要遵守两个原则:一是转子磁动势不变,二是转子电路的功率和损耗不变。设转子频率为  $f_2$ ,定子频率为  $f_1$ 。

三相异步电动机的转子绕组正常运行时,每相的电流为

$$\dot{I}_{2s} = \frac{\dot{E}_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{\dot{E}_{2s}}{R_2 + jX_{2s}} = \frac{s\dot{E}_2}{R_2 + jsX_2} \quad (3-8)$$

式中, $\dot{E}_2$  为转子不动时的感应电动势(V), $\dot{E}_2 = 4.44f_1 N_2 K_2 \Phi_m$ ;  $Z_{2s}$  为转子绕组在转差率为  $s$  时的漏阻抗( $\Omega$ );  $X_{2s}$  为转子电抗( $\Omega$ ),  $X_{2s} = 2\pi f_2 L_2$ ;  $X_2$  为转子不动时的每相漏电抗( $\Omega$ ),  $X_2 = 2\pi f_1 L_2$ 。

将式(3-8)分子、分母同时除以  $s$ ,得

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2} \quad (3-9)$$

由式(3-8)和式(3-9)可知,频率折算的方法是将原转子电路中的电阻  $R_2$  除以  $s$  变换为

$R_2/s$ , 即在原转子电路中串联一个阻值大小为  $(1-s)R_2/s$  的附加电阻。经频率折算后, 原旋转的转子就被静止的转子代替, 此时静止的转子不再有机功率输出及机械损耗。由能量守恒定律可知, 原转子的机械功率及损耗将全部消耗在附加电阻  $(1-s)R_2/s$  上, 即附加电阻  $(1-s)R_2/s$  上消耗的功率等于转轴上的机械功率和转子机械损耗之和, 称为总机械功率。

## 2. 转子绕组折算

三相异步电动机转子绕组的折算和变压器的绕组折算一样, 是用一个和定子绕组具有相同相数  $m_1$ 、每相匝数为  $N_1$  及绕组系数为  $K_{w1}$  的等效转子绕组, 代替原来相数为  $m_2$ 、每相匝数为  $N_2$  及绕组系数为  $K_{w2}$  的实际转子绕组。一般在折算后的值上加“'”予以区别。

根据转子磁动势折算前后保持不变的原则, 可知

$$\frac{m_2}{2} \times 0.9 \times \frac{N_2 K_{w2}}{p} I_2 = \frac{m_1}{2} \times 0.9 \times \frac{N_1 K_{w1}}{p} I_2'$$

折算后的转子电流为

$$I_2' = \frac{m_2 N_2 K_{w2}}{m_1 N_1 K_{w1}} I_2 = \frac{1}{K_i} I_2 \quad (3-10)$$

式中,  $K_i$  为电流比,  $K_i = m_1 N_1 K_{w1} / (m_2 N_2 K_{w2})$ 。

根据转子的视在功率折算前后不变的原则, 可知

$$m_2 E_2 I_2 = m_1 E_2' I_2'$$

折算后的转子电动势为

$$E_2' = \frac{N_1 K_{w1}}{N_2 K_{w2}} E_2 = K_v E_2 \quad (3-11)$$

式中,  $K_v$  为电动势比,  $K_v = N_1 K_{w1} / (N_2 K_{w2})$ 。

根据转子铜损耗在折算前后不变的原则, 可知

$$m_2 I_2^2 R_2 = m_1 I_2'^2 R_2'$$

折算后的转子电阻为

$$R_2' = \frac{m_2}{m_1} R_2 \left( \frac{I_2}{I_2'} \right)^2 = \left( \frac{N_1 K_{w1}}{N_2 K_{w2}} \right)^2 R_2 = K_i K_v R_2 \quad (3-12)$$

式中,  $K_i K_v$  为阻抗比。

## 二、三相异步电动机的等效电路

### 1. 折算后的基本方程

折算后, 三相异步电动机的基本方程组为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_1 + jX_1) \\ \dot{U}_2' &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' (R_2' + jX_2') \\ \dot{E}_1 &= -(R_f + jX_f) \dot{I}_0 \\ \dot{E}_2' &= \dot{E}_1 \\ \dot{U}_2' &= \dot{I}_2' \frac{1-s}{s} R_2' \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2' &= \dot{I}_0 \end{aligned} \right\} \quad (3-13)$$

## 2. T形等效电路

由式(3-13)可画出三相异步电动机的 T形等效电路,如图 3-8 所示。

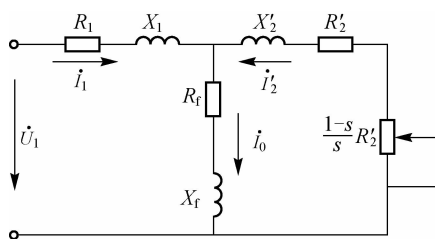


图 3-8 三相异步电动机的 T形等效电路

由等效电路和三相异步电动机的基本方程组可知,当转子不动(如堵转或启动)时附加电阻为零,即总机械功率为零;当转子的转速接近于同步转速时,等效电路近似于开路,转子的电流很小,总机械功率也很小。

## 3. 简化等效电路

由于图 3-8 中的 T形等效电路是一个串、并联混合电路,计算和分析时比较复杂。因此,在实际应用时常把励磁电流移到输入端,这样电路就简化为单纯的并联电路,如图 3-9 所示。

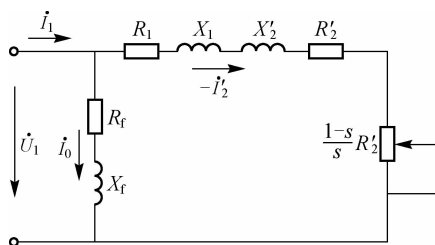


图 3-9 三相异步电动机简化等效电路

## 4. 相量图

由折算后的三相异步电动机的基本方程,可以画出相应的相量图,如图 3-10 所示。

绘制相量图的一般步骤如下:

(1) 以主磁通  $\dot{\Phi}_m$  为参考相量,将其画在水平轴位置。

(2) 画定子绕组的电动势相量  $\dot{E}_1$  和折算后的转子绕组电动势相量  $\dot{E}'_2$ ,均滞后于主磁通  $\dot{\Phi}_m$   $90^\circ$ 。

(3) 画励磁电流相量  $\dot{I}_0$ ,其超前于主磁通一个铁耗角  $\alpha_{Fe}$ ,由折算后的转子绕组电动势  $\dot{E}'_2$  和转子绕组总阻抗来画出相量  $\dot{I}'_2$ 。

(4) 由  $-\dot{I}'_2$  和  $\dot{I}_0$  叠加画出  $\dot{I}_1$ ,画  $jX'_2 \dot{I}'_2$  超前  $\dot{I}'_2$   $90^\circ$ ,  $(R'_2/s) \dot{I}'_2$  与  $\dot{I}'_2$  同相。

(5) 画  $R_1 \dot{I}_1$  与  $\dot{I}_1$  同相,  $jX_1 \dot{I}_1$  超前  $\dot{I}_1$   $90^\circ$ 。

从相量图可以看出,异步电动机的定子电流  $\dot{I}_1$  总

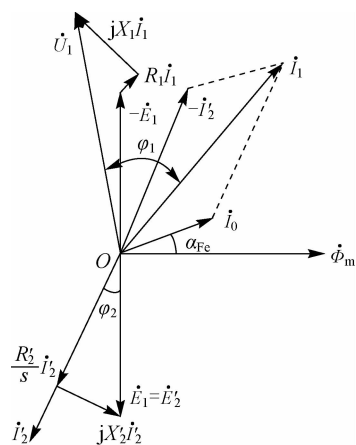


图 3-10 三相异步电动机的相量图

是滞后于电源电压  $\dot{U}_1$ 。这是因为建立和维持气隙中的主磁通和定子、转子漏磁通,需要从电源吸收一定的功率。这些功率是感性无功功率,即异步电动机的功率因数总是小于 1。

## 学习情境四 三相异步电动机的功率平衡、 转矩平衡和工作特性

### 一、三相异步电动机的功率平衡

三相异步电动机定子绕组从电网吸收电功率并产生电磁功率,转子向机械负载输出机械功率。电动机在实现机电能量转换的过程中,不可避免地会产生一些损耗。根据能量守恒定律可知,输出功率应等于输入功率减去总损耗。

输入功率是指三相异步电动机从电网吸收的总功率。当三相异步电动机稳定运行时,其输入功率  $P_1$  为

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (3-14)$$

式中,  $U_1$  为定子电压;  $I_1$  为定子电流;  $m_1$  为相数。

定子电流  $I_1$  流过定子绕组电阻  $R_1$  上产生的功率损耗即为定子铜损耗  $P_{Cu1}$ , 其计算公式为

$$P_{Cu1} = m_1 I_1^2 R_1 \quad (3-15)$$

在异步电动机运行的过程中,由于转子的转速接近于同步转速,频率很低,故转子的铁损耗很小,可以忽略不计。因此,异步电动机的铁损耗可近似看成是定子铁损耗  $P_{Fe}$ , 即

$$P_{Fe} = m_1 R_f I_0^2 \quad (3-16)$$

定子传递到转子回路的电磁功率  $P_{em}$  等于输入功率  $P_1$  减去定子的损耗, 即

$$P_{em} = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe}$$

化简得

$$P_{em} = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe} = m_1 I_2'^2 \left( R_2' + \frac{1-s}{s} R_2' \right) = m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{s} \quad (3-17)$$

则电磁功率  $P_{em}$  可表示为

$$P_{em} = m_1 E_2' I_2' \cos \varphi_2 = m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{s} \quad (3-18)$$

当转子电流  $I_2$  流过转子绕组时,在转子绕组上产生的损耗为转子铜损耗  $P_{Cu2}$ , 即

$$P_{Cu2} = m_1 I_2'^2 R_2' \quad (3-19)$$

异步电动机转子的总机械功率  $P_{mec}$  为传递到转子的电磁功率  $P_{em}$  减转子的铜损耗  $P_{Cu2}$ , 即

$$P_{mec} = P_{em} - P_{Cu2}$$

化简得

$$P_{mec} = m_1 \frac{1-s}{s} R_2' I_2'^2 \quad (3-20)$$

由式(3-18)和式(3-19)可得

$$P_{Cu2} = s P_{em} \quad (3-21)$$



由式(3-18)和式(3-20)可得

$$P_{\text{mec}} = (1-s)P_{\text{em}} \quad (3-22)$$

式(3-21)和式(3-22)说明,传到转子的电磁功率  $P_{\text{em}}$  只有一小部分  $sP_{\text{em}}$  转变为转子的铜损耗,其中大部分  $(1-s)P_{\text{em}}$  转变为总机械功率。

在异步电动机运行时,由轴承及风阻等摩擦引起的损耗,称为机械损耗,用  $P_{\text{m}}$  表示。除此之外,还有由定子、转子开槽及磁动势中的谐波磁场引起的附加损耗  $P_{\text{add}}$ 。异步电动机的附加损耗很小,一般不容易计算,在大型异步电动机中约为  $0.5\%P_{\text{N}}$ ;在小型异步电动机中,满载时可达  $1\% \sim 3\%$  或更大。

转轴上真正输出的功率  $P_2$  为转子的总机械功率  $P_{\text{mec}}$  减去机械损耗  $P_{\text{m}}$  和附加损耗  $P_{\text{add}}$ ,即

$$P_2 = P_{\text{mec}} - (P_{\text{m}} + P_{\text{add}}) \quad (3-23)$$

因此,可得电源输入电功率  $P_1$  与转轴上输出功率  $P_2$  之间的关系为

$$P_2 = P_1 - P_{\text{Cu1}} - P_{\text{Fe}} - P_{\text{Cu2}} - P_{\text{m}} - P_{\text{add}} = P_1 - \sum P \quad (3-24)$$

式中,  $\sum P$  为异步电动机的总损耗,  $W$ 。

三相异步电动机的效率  $\eta$  为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{\sum P}{P_1}\right) \times 100\% \quad (3-25)$$

三相异步电动机的功率流程,如图 3-11 所示。

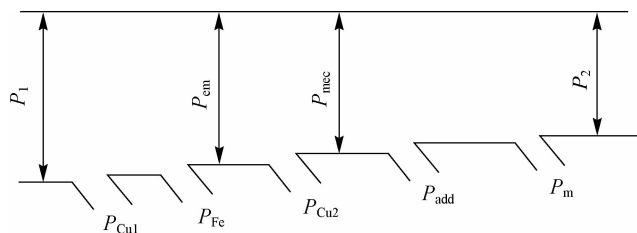


图 3-11 异步电动机功率流程图

## 二、三相异步电动机的转矩平衡

由式(3-23)两边同除以角速度  $\omega$ ,可得

$$\frac{P_2}{\omega} = \frac{P_{\text{mec}}}{\omega} - \frac{P_{\text{m}} + P_{\text{add}}}{\omega}$$

即

$$T_2 = T_{\text{em}} - T_0 \quad (3-26)$$

式中,  $T_{\text{em}}$  为异步电动机的电磁驱动转矩 ( $N \cdot m$ ),  $T_{\text{em}} = P_{\text{mec}}/\omega$ ;  $T_2$  为异步电动机转轴上输出的机械负载转矩 ( $N \cdot m$ ), 是制动转矩,  $T_2 = P_2/\omega$ ;  $T_0$  为空载制动转矩 ( $N \cdot m$ ),  $T_0 = (P_{\text{m}} + P_{\text{add}})/\omega$ 。

由式(3-22)得

$$T_{\text{em}} = \frac{P_{\text{mec}}}{\omega} = \frac{(1-s)P_{\text{em}}}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{P_{\text{em}}}{\frac{2\pi n_1}{60}} = \frac{P_{\text{em}}}{\omega_1} \quad (3-27)$$

式中,  $\omega_1$  为同步角速度 ( $\text{rad/s}$ ),  $\omega_1 = 2\pi n_1/60$ 。

式(3-27)表明,电磁转矩既可以用转子的总机械功率除以角速度  $\omega$  来计算,又可以用电

磁功率除以同步角速度来计算。

**例 3-2** 某三相异步电动机的定子采用三角形联结, 额定电压  $U_N = 380 \text{ V}$ , 额定频率  $f_N = 50 \text{ Hz}$ , 额定功率  $P_N = 7.5 \text{ kW}$ , 额定转速  $n_N = 960 \text{ r/min}$ , 额定负载时  $\cos \varphi_1 = 0.824$ , 定子铜损耗  $P_{\text{Cu1}} = 474 \text{ W}$ , 铁损耗  $P_{\text{Fe}} = 231 \text{ W}$ , 机械损耗  $P_m = 45 \text{ W}$ , 附加损耗  $P_{\text{add}} = 37.5 \text{ W}$ 。试计算额定负载时转差率、转子电流的频率、转子铜耗、效率和定子电流。

**解** (1) 磁场转速  $n_1$  为

$$n_1 = \frac{60f_N}{p} = \frac{60 \times 50}{3} \text{ r/min} = 1\,000 \text{ r/min}$$

则转差率  $s$  为

$$s = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1\,000 - 960}{1\,000} = 0.04$$

(2) 转子电流的频率  $f_2$  为

$$f_2 = sf_N = 0.04 \times 50 \text{ Hz} = 2 \text{ Hz}$$

(3) 总机械功率  $P_{\text{mec}}$  为

$$P_{\text{mec}} = P_N + P_{\text{add}} + P_m = (7\,500 + 37.5 + 45) \text{ W} = 7\,582.5 \text{ W}$$

则转子铜耗  $P_{\text{Cu2}}$  为

$$P_{\text{Cu2}} = \frac{s}{1-s} P_{\text{mec}} = \frac{0.04}{1-0.04} \times 7\,582.5 \text{ W} = 315.94 \text{ W}$$

(4) 输入功率  $P_1$  为

$$P_1 = P_{\text{mec}} + P_{\text{Cu2}} + P_{\text{Cu1}} + P_{\text{Fe}} = (7\,582.5 + 315.94 + 474 + 231) \text{ W} = 8\,603.44 \text{ W}$$

效率  $\eta$  为

$$\eta = \frac{P_N}{P_1} \times 100\% = \frac{7\,500}{8\,603.44} \times 100\% = 87.17\%$$

(5) 定子电流  $I_1$  为

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_N \cos \varphi_1} = \frac{8\,603.44}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.824} \text{ A} = 15.86 \text{ A}$$

### 三、三相异步电动机的工作特性

三相异步电动机的工作特性是指在额定电压和额定频率下运行时, 电动机的转速  $n$ 、定子电流  $I_1$ 、功率因数  $\cos \varphi_1$ 、电磁转矩  $T_{\text{em}}$ 、效率  $\eta$  等与输出功率  $P_2$  的关系, 如图 3-12 所示。

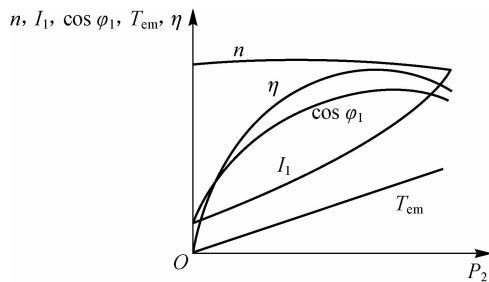


图 3-12 三相异步电动机的工作特性

### 1. 转速特性

转速特性是指异步电动机在额定电压和额定频率下运行时,转速随输出功率变化而变化的关系,可用曲线  $n=f(P_2)$  表示。

由式(3-21)得

$$s = \frac{P_{Cu2}}{P_{em}} = \frac{m_1 R_2' I_2'^2}{m_1 E_2' I_2' \cos \varphi_2} \quad (3-28)$$

由式(3-28)可知,当异步电动机空载时,输出功率  $P_2 \approx 0$ ,转子的电流很小,即  $I_2' \approx 0$ 。由于转差率  $s$  与  $I_2'$  成正比,因此

$$s \approx 0, \quad n \approx n_1$$

随着负载的增大,转子电流也增大,这必然导致转差率  $s$  增大,转速  $n$  减小。一般情况下,额定转差率  $s_N = 0.01 \sim 0.06$ ,额定转速  $n_N = (0.99 \sim 0.94)n_1$ ,所以转速特性是一条稍向下倾斜的曲线。

### 2. 转矩特性

转矩特性是指异步电动机在额定电压和额定频率下运行时,转矩随输出功率变化而变化的关系,可用变化曲线  $T_2=f(P_2)$  表示。

异步电动机的输出转矩为

$$T_2 = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_2}{\frac{2\pi n}{60}} \quad (3-29)$$

当异步电动机的负载在额定范围之内时,转速和角速度变化很小;当电动机空载时,输出转矩为零,故  $T_2=f(P_2)$  为一条过原点且斜率为  $1/\omega$  的直线。

### 3. 定子电流特性

定子电流特性是指异步电动机在额定电压和额定频率下运行时,定子电流随输出功率变化而变化的关系,可用曲线  $I_1=f(P_2)$  表示。

异步电动机的定子电流为

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2')$$

当电动机空载时,转子电流  $I_2' \approx 0$ ,此时定子电流  $\dot{I}_1$  几乎全部为励磁电流  $\dot{I}_0$ 。当电动机负载时,随着输出功率的增大,转子电流增大,定子电流亦随之增大,且定子电流的增大几乎随输出功率按正比例增加。

### 4. 定子功率因数特性

定子功率因数特性是指异步电动机在额定电压和额定频率下运行时,定子功率因数随输出功率变化而变化的关系,可用曲线  $\cos \varphi_1=f(P_2)$  表示。

异步电动机对电源来说,相当于一个感性负载,它必须从电网吸收感性无功功率。当电动机空载时,定子电流  $\dot{I}_1$  几乎全部为励磁电流  $\dot{I}_0$ ,主要用于无功励磁,所以功率因数  $\cos \varphi_1$  很低,通常为  $0.1 \sim 0.2$ 。由定子功率因数特性曲线可知,随着负载的增大,功率因数也逐渐增大,当接近额定负载时,功率因数达到最大。

当电动机负载超过额定值时,转差率  $s$  的值就会增大,随着  $\varphi_2 = \arctan(sX_f/R_f)$  的增大,转子功率因数  $\cos \varphi_2$  减小。由于转子电流中的无功分量增加,使得电动机定子功率因数  $\cos \varphi_1$  又重新下降。

### 5. 效率特性

效率特性是指异步电动机在额定电压和额定频率下运行时,效率随输出功率变化而变化的关系,可用曲线  $\eta=f(P_2)$  表示。

由式(3-25)知

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu1} + P_{Fe} + P_{Cu2} + P_m + P_{add}} \quad (3-30)$$

由式(3-31)知,当电动机空载时,输出功率  $P_2=0$ ,故效率  $\eta=0$ 。随着负载的增加,输出功率  $P_2$  增大,效率  $\eta$  也增大。在异步电动机中,损耗分为不变损耗  $P_{Fe}$ 、 $P_m$  和可变损耗  $P_{Cu2}$ 、 $P_{Cu1}$ 、 $P_{add}$  两部分。当负载增大到可变损耗等于不变损耗时,电动机的效率最高。若负载继续增大,可变损耗也继续增大,电动机的效率就开始下降。

## 学习情境五 三相异步电动机的机械特性

三相异步电动机的机械特性是指电动机的转速  $n$  与电磁转矩  $T_{em}$  或转差率  $s$  之间的函数关系,即  $n=f(T_{em})$  或  $n=f(s)$ 。

### 一、三相异步电动机机械特性的表达式

#### 1. 物理表达式

由式(3-18)和式(3-27)知

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{P_{em}}{\omega_1} = \frac{m_1 E_2' I_2' \cos \varphi_2}{\frac{2\pi n_1}{60}} = \frac{m_1 \times 4.44 f_1 N_1 K_{wl} \Phi_m I_2' \cos \varphi_2}{2\pi \frac{f_1}{p}} \\ &= \frac{4.44 m_1 p N_1 K_{wl}}{2\pi} \Phi_m I_2' \cos \varphi_2 = C_T \Phi_m I_2' \cos \varphi_2 \end{aligned} \quad (3-31)$$

式中,  $C_T$  为转矩常数,  $C_T = 4.44 m_1 p N_1 K_{wl} / 2\pi$ 。

式(3-31)反映了异步电动机在不同转速时电磁转矩与主磁通的关系,因此,这一表达式称为物理表达式。

根据简化等效电路得

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (3-32)$$

式中,  $X_1$  为定子绕组漏电抗( $\Omega$ );  $X_2'$  为转子绕组旋转漏电抗折算( $\Omega$ )。

功率因数为

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2'}{\sqrt{R_2'^2 + (sX_{20}')^2}} \quad (3-33)$$

式中,  $X_{20}'$  为转子绕组静止漏电抗( $\Omega$ )。

#### 2. 参数表达式

由式(3-18)和式(3-27)得





$$T_{\text{em}} = \frac{P_{\text{mec}}}{\omega} = \frac{m_1 I_2'^2 R_2'}{s} \cdot \frac{p}{2\pi f_1} \quad (3-34)$$

将式(3-32)代入式(3-34)可得

$$T_{\text{em}} = \frac{m_1 p U_1^2 R_2'}{2\pi s f_1 \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} \quad (3-35)$$

式(3-35)反映了电磁转矩与电动机各参数之间的关系,称为参数表达式,其中定子电压  $U_1$ 、电源频率  $f_1$ 、定子绕组电阻和漏电抗以及折算后的各参数都是不随转差率变化的常量。由于电磁转矩  $T_{\text{em}}$  是用异步电动机的参数表示的,因此,根据电动机的参数来计算和分析电磁转矩很方便。

对式(3-35)求导数  $dT_{\text{em}}/ds$  且令  $dT_{\text{em}}/ds=0$ , 可得临界转差率为

$$s_m = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (3-36)$$

最大电磁转矩为

$$T_m = \pm \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}]} \quad (3-37)$$

一般情况下,  $R_1 \ll X_1 + X_2'$ , 所以式(3-36)和式(3-37)可分别变换为

$$s_m \approx \pm \frac{R_2'}{X_1 + X_2'} \quad (3-38)$$

$$T_m \approx \pm \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 (X_1 + X_2')} \quad (3-39)$$

由式(3-38)和式(3-39)可以得出:

(1)最大转矩  $T_m$  与电压  $U_1^2$  成正比,与漏电抗  $X_1 + X_2'$  成反比。

(2)临界转差率  $s_m$  与  $R_2'$  成正比。

最大电磁转矩  $T_m$  与额定电磁转矩  $T_N$  的比值称为电动机的过载能力,用字母  $\lambda$  表示,其表达式为

$$\lambda = \frac{T_m}{T_N} \quad (3-40)$$

$\lambda$  是表征电动机运行性能的重要参数,它反映了电动机短时过载能力的大小。一般异步电动机的过载能力为 1.6~2.2,起重、冶金机械专用电动机的过载能力为 2.2~2.8。但是一般不建议电动机长期工作在最大转矩处,因为电流过大会使电动机烧毁。

除了最大电磁转矩  $T_m$  之外,异步电动机还有一个重要的参数,即启动转矩  $T_{\text{st}}$ ,它是异步电动机开始启动时的电磁转矩,将  $s=1$  代入式(3-36)可得

$$T_{\text{st}} = \frac{m_1 p U_1^2 R_2'}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]} \quad (3-41)$$

由式(3-41)可知,启动转矩  $T_{\text{st}}$  与电压的平方成正比。对于绕线型异步电动机,可以通过转子电路串联电阻的方法增大启动转矩,改善启动性能。笼型异步电动机则不能用转子电路串联电阻的方法来改变启动转矩  $T_{\text{st}}$ ,在额定电压下启动转矩  $T_{\text{st}}$  是一个恒定不变的值。

启动转矩  $T_{\text{st}}$  与额定转矩  $T_N$  的比值称为启动转矩倍数,用字母  $K_{\text{st}}$  表示,其表达式为

$$K_{\text{st}} = \frac{T_{\text{st}}}{T_N} \quad (3-42)$$

$K_{st}$ 是异步电动机的一个重要参数,它反映了电动机的启动能力。显然,当启动转矩  $T_{st}$  大于负载转矩  $T_L$  时,电动机才能启动。在额定负载下,只有  $K_{st} > 1$  时,笼型异步电动机才能启动。一般笼型异步电动机的启动转矩倍数为  $1.0 \sim 2.0$ ,起重、冶金机械专用电动机的启动转矩倍数为  $2.8 \sim 4.0$ 。

### 3. 实用表达式

机械特性的参数表达式虽然清楚地表示了电磁转矩与电动机各参数之间的关系,但是在实际应用时,三相异步电动机的参数不易得到,所以参数表达式使用起来不方便。因此,利用异步电动机的铭牌数据求得其机械特性表达式(即机械特性的实用表达式)更具有实用价值。

用式(3-35)除以式(3-39)并考虑到式(3-38),化简后得异步电动机机械特性的实用表达式为

$$\frac{T_{em}}{T_m} = \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$$

即

$$T_{em} = \frac{2T_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \quad (3-43)$$

式(3-43)中的  $T_m$  和  $s_m$  可由电动机产品目录中查得的额定数据求得,在工程计算中比较实用,所以被称为机械特性的实用表达式。下面介绍求  $T_m$  和  $s_m$  的方法。

当电动机在额定负载下运行时,转差率  $s$  很小,因此,可近似认为  $s/s_m \approx 0$ ,这样可得式(3-43)的线性表达式

$$T_{em} = \frac{2T_m s}{s_m} \quad (3-44)$$

由式(3-40)可得

$$T_m = \lambda T_N \quad (3-45)$$

式中,  $T_N = 9\,550 P_N / n_N$ 。

当  $s = s_N$  时,将  $T_{em} = T_N$  和式(3-45)代入式(3-43),化简得

$$s_m = s_N (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) \quad (3-46)$$

式中,  $s_N$  为额定转差率。

当求得  $T_m$  和  $s_m$  时,便可得出异步电动机的机械特性方程式。

前面所述的异步电动机机械特性的3种表达式,可应用于不同的场合。一般情况下,物理表达式适用于定性分析电动机的运行特性;参数表达式适用于分析电动机各个参数的变化对电动机运行性能的影响;实用表达式适用于电动机机械特性的工程计算。

**例 3-3** 一台异步电动机的铭牌数据为  $P_N = 2.6 \text{ kW}$ ,  $U_{1N} = 380 \text{ V}$ ,  $f_1 = 50 \text{ Hz}$ ,  $n_N = 722 \text{ r/min}$ ,过载能力  $\lambda = 2.13$ 。试求电动机的实用机械特性方程。

**解** 电动机的额定转矩为

$$T_N = 9\,550 \frac{P_N}{n_N} = 9\,550 \times \frac{2.6}{722} \text{ N} \cdot \text{m} = 34.39 \text{ N} \cdot \text{m}$$

最大转矩为

$$T_m = \lambda T_N = 2.13 \times 34.39 \text{ N} \cdot \text{m} = 73.25 \text{ N} \cdot \text{m}$$



与 722 r/min 最接近的是 750 r/min, 因此, 可确定  $n_1 = 750$  r/min。则额定转差率为

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{750 - 722}{750} = 0.037$$

临界转差率为

$$s_m = s_N(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0.037 \times (2.13 + \sqrt{2.13^2 - 1}) = 0.15$$

实用机械特性方程为

$$T_{em} = \frac{2T_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} = \frac{2 \times 73.25}{\frac{s}{0.15} + \frac{0.15}{s}} = \frac{146.5}{\frac{s}{0.15} + \frac{0.15}{s}}$$

## 二、三相异步电动机的固有机械特性

固有机械特性是异步电动机在额定频率及额定电压下工作, 并按规定的接线方法接线, 定子及转子电路中不接电阻或电抗时所得到的曲线, 如图 3-13 所示。

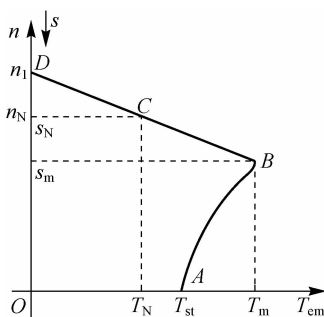


图 3-13 三相异步电动机的固有机械特性

为了更好地描述机械特性的特点, 现就几个特殊点进行说明:

- (1) 启动点 A。电动机启动瞬间,  $n=0, s=1, T_{em}=T_{st}$ , 启动(定子)电流  $I_1=(4\sim 7)I_N$ 。
- (2) 最大转矩点 B。图 3-13 中 B 点为电动状态的最大转矩点, 此时,  $T_{em}=T_m, s=s_m$ 。一般情况下, 电动机在线性段 DB 上工作时是稳定的, 而在非线性段 BA 上工作时是不稳定的, 因此, B 点是电动机稳定运行的临界点。
- (3) 额定工作点 C。图 3-13 中 C 点为电动机额定运行时的工作点, 此时  $n=n_N, s=s_N, T_{em}=T_N, I_1=I_N$ 。额定运行时, 电动机的转差率很小, 一般为 0.01~0.06。
- (4) 同步转速点 D。图 3-13 中 D 点为电动机的理想空载点, 即转子转速与同步转速基本一致。此时,  $n=n_1, s=0, T_{em}=0$ , 转子电流  $I_2=0$ 。D 点为电动状态与回馈制动状态的转折点。

## 三、三相异步电动机的人为机械特性

人为机械特性是三相异步电动机在改变电源电压、电源频率、定子极对数或增大定子、转子阻抗的情况下所得到的机械特性。所以, 三相异步电动机的人为机械特性种类很多, 这里只介绍常用的两种。

### 1. 降低定子电压的人为机械特性

由前面的分析可知, 当降低定子电压  $U_1$  时, 电磁转矩  $T_{em}$  与电压  $U_1^2$  成正比地降低,  $s_m$

和  $n_1$  不变,最大转矩和启动转矩都随电压的平方成正比地降低,如图 3-14 所示。

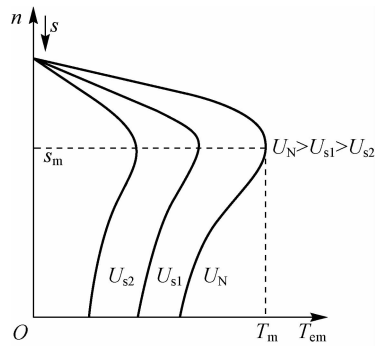


图 3-14 异步电动机降低定子电压的人为机械特性

## 2. 转子串联电阻的人为机械特性

在绕线型异步电动机中,通常在转子电路中串入三相对称电阻,此时同步转速  $n_1$  和最大转矩  $T_m$  不变,临界转差率  $s_m$  与转子电阻成正比,如图 3-15 所示。

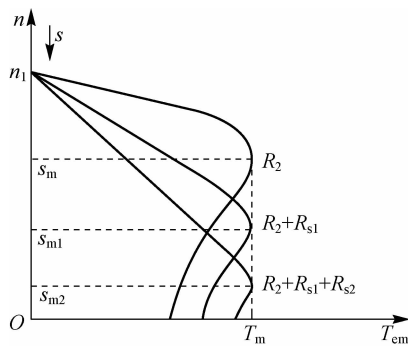


图 3-15 绕线型异步电动机转子串联电阻的人为机械特性

## 学习情境六 三相异步电动机的启动

三相异步电动机的启动是指异步电动机定子绕组接入电网后,转子从静止状态到稳定运行状态的过程。一般中、小型异步电动机启动时间很短,通常是几秒到几十秒钟。

一般情况下,异步电动机的启动要求有两点:

- (1) 要求有足够大的启动转矩,以缩短启动时间。
- (2) 要求有比较小的启动电流,以减小启动时供电线路的电压降。

然而,异步电动机实际的启动性能却正好与要求相反。启动转矩不大,只有额定转矩的 1~2 倍;启动电流很大,一般为额定电流的 4~7 倍,这样大的启动电流不仅会增大供电线路的电压降,同时也会使电动机发热。所以,通常要改善其启动性能,就要减小启动电流和增大启动转矩。

## 一、三相笼型异步电动机的启动

三相笼型异步电动机的启动方法主要有直接启动和降压启动两种。

### 1. 直接启动

直接启动就是利用开关或接触器将电动机的定子绕组直接接入额定电压的电网中,也称为全压启动。直接启动时,启动电流很大,因此,一般选取熔体的额定电流为电动机额定电流的 2.5~3.5 倍。这种启动方法的优点是操作简便,启动设备简单。

对于频繁启动的电动机,过大的启动电流将造成电动机发热,影响电动机的使用寿命。同时,由于端部电动力的作用,绕组会发生变形甚至造成短路而烧坏电动机;过大的启动电流还会使供电线路的压降增大,影响同一线路上的其他用电设备正常运行,甚至由于欠压保护而使得正在运行的电气设备断电。

一般情况,异步电动机的功率低于 7.5 kW 时,允许直接启动。若电动机的功率大于 7.5 kW,但电网的功率较大,而且满足下式时,也可直接启动。

$$K_1 = \frac{I_{st}}{I_N} \leq \frac{1}{4} \left( 3 + \frac{\text{电源变压器容量}}{\text{启动电动机功率}} \right) \quad (3-47)$$

若不满足式(3-47)的要求,则必须采用降压启动。

### 2. 降压启动

对于笼型异步电动机而言,若其功率较大,且不满足式(3-47)要求时,则必须采用降压启动来减小启动电流。常用的降压启动的方法有定子串联电阻(电抗)启动、Y-△降压启动和自耦变压器降压启动。

#### 1) 定子串联电阻降压启动

定子串联电阻降压启动是指在定子电路中串联电阻或电抗,来降低电动机定子绕组上的电压的启动方法。

如图 3-16 所示为定子串联电阻降压启动原理。启动时,把开关 KM2 断开,闭合主开关 KM1。此时,启动电阻或电抗接入定子电路。启动结束后,将开关 KM2 闭合,电动机正常运行。

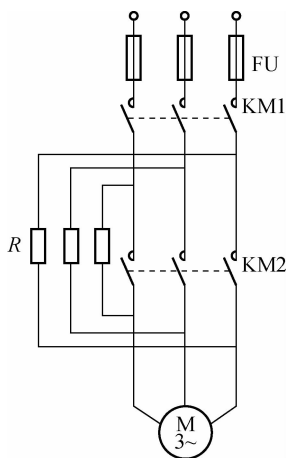


图 3-16 定子串电阻降压启动原理

对全压启动与降压启动时的启动电流及启动转矩进行分析比较如下。

(1) 在电动机全压启动时, 定子绕组两端电压为  $U_1$ , 全压启动时电流为  $I_{st}$ , 即

$$I_{st} = \frac{U_1}{Z_s} \quad (3-48)$$

式中,  $Z_s$  为每相回路阻抗,  $\Omega$ 。

(2) 串联入电阻降压启动时, 定子绕组两端电压为  $U_2$  ( $U_1 = KU_2, K > 1$ ), 此时启动电流为  $I_{st2}$ , 即

$$I_{st2} = \frac{U_2}{Z_s} \quad (3-49)$$

由于  $T_{st}$  与  $U_1^2$  成正比, 故结合式(3-48)和式(3-49)得

$$\left. \begin{aligned} \frac{I_{st2}}{I_{st}} &= \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{K} \\ \frac{T_{st2}}{T_{st}} &= \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = \frac{1}{K^2} \end{aligned} \right\} \quad (3-50)$$

由上面的分析可知, 定子绕组串联电阻降压启动时, 启动电流降为全压启动时的  $1/K$ , 启动转矩为全压启动时的  $1/K^2$ , 从而起到了降低启动电流和启动转矩的作用。

定子串联电阻降压启动的优点是启动平稳, 运行可靠, 设备简单。缺点是启动转矩随电压的降低而成平方降低, 启动时电能损耗较大。适用于轻载启动, 但由于其设备成本较高, 因此实际应用不多。

## 2) Y- $\Delta$ 降压启动

Y- $\Delta$ 降压启动, 即星形—三角形降压启动。此方法只适用于电动机正常运行且定子绕组为三角形联结的情况。启动时, 电动机接成星形联结, 即先将定子绕组的 3 个末端 W2、U2、V2 用导线联结在一起, 把首端 U1、V1、W1 引出接电源, 如图 3-17(a) 所示。启动结束(正常运行)时, 电动机接成三角形联结, 即将定子绕组的 W2 与 U1、U2 与 V1、V2 与 W1 分别用导线联结在一起, 然后将 U1、V1、W1 引出接电源, 如图 3-17(b) 所示, 从而使电动机在额定电压下正常运行。

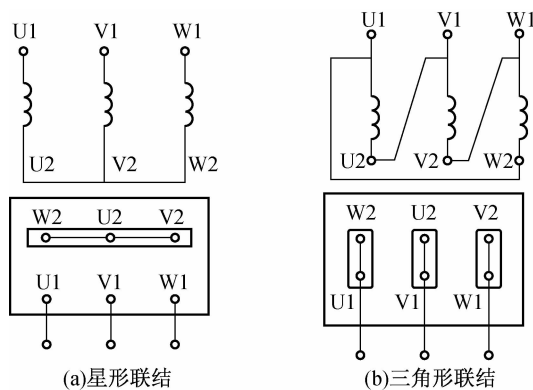


图 3-17 三相异步电动机 Y- $\Delta$ 降压启动接线图

现将电动机定子绕组在不同联结方式时的情况分析如下。

(1) 电动机定子绕组联结成星形启动时, 启动电流为

$$I_Y = \frac{U_N}{\sqrt{3}Z_s} \quad (3-51)$$

式中,  $Z_g$  为每相回路阻抗( $\Omega$ );  $U_N$  为额定电压(V)。

(2) 电动机定子绕组联结成三角形启动时, 其启动电流为

$$I_{\Delta} = \sqrt{3} \frac{U_N}{Z_g} \quad (3-52)$$

由于  $T_{st}$  与  $U_1^2$  成正比, 且  $P=UI$ , 结合式(3-51)和式(3-52)可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{I_Y}{I_{\Delta}} &= \frac{1}{3} \\ \frac{T_Y}{T_{\Delta}} &= \left( \frac{U_N}{\sqrt{3}U_N} \right)^2 = \frac{1}{3} \\ \frac{P_Y}{P_{\Delta}} &= \frac{I_Y U_Y}{I_{\Delta} U_{\Delta}} = \frac{1}{3} \end{aligned} \right\} \quad (3-53)$$

这样, 在启动时就把定子每相绕组上的电压降到正常工作电压的  $1/\sqrt{3}$ , 启动电流为正常工作电流的  $1/3$ , 从而实现了降压启动的目的。

Y- $\Delta$ 降压启动设备比较简单, 运行可靠, 由于星形联结时的启动电流只有三角形联结时的  $1/3$ , 启动转矩和功率也会降到三角形联结时的  $1/3$ , 因此, Y- $\Delta$ 降压启动方法适用于电动机轻载或负载较小时的启动。

### 3) 自耦变压器降压启动

自耦变压器降压启动又称为自耦补偿器降压启动, 它是通过三相自耦变压器把电压降低后加到电动机定子绕组上, 以减小启动电流的启动方法。

如图 3-18 所示为自耦变压器降压启动原理。启动时, 自耦变压器的高压侧接电网, 电动机的定子绕组接到自耦变压器的低压侧上; 启动结束(正常运行)时, 将电动机直接接到电网(额定电压)上运行, 同时将自耦变压器从电网上切除。

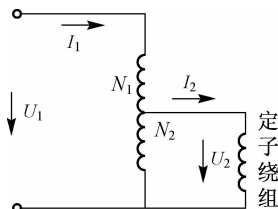


图 3-18 自耦变压器降压启动原理

设自耦变压器的变比为  $K$ , 则

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

式中,  $N_1$  为高压侧绕组匝数;  $N_2$  为低压侧绕组匝数。

启动时对启动电流及启动转矩的分析比较同定子串联电阻降压启动。

由前面的分析可知, 采用自耦变压器后, 启动电流  $I_{st2}$  降到了全压启动时的  $1/K$ , 启动转矩  $T_{st2}$  降到了全压启动时的  $1/K^2$ 。一般情况下, 自耦变压器的低压侧有 3 个抽头(分别为电源电压的 40%、60%和 80%)来满足不同负载的要求。

自耦变压器降压启动的优点是在限制启动电流相同的情况下(与定子串联电阻降压启动比较), 可以获得比较大的启动转矩。缺点是设备质量和体积较大, 造价高。常用于电动机容量较大且不频繁启动的场合。

## 二、三相绕线型异步电动机的启动

三相绕线型异步电动机的启动方法通常有转子串联电阻启动和转子串联频敏变阻器启动。

### 1. 转子串联电阻启动

所谓转子串联电阻启动,即启动时在电动机定子电路中串入多级电阻,待电动机转速基本稳定时再将其从定子电路中一切除,如图 3-19 所示为转子串联电阻启动接线图。

转子串联电阻启动过程如下。

(1)接触器触头 KM1、KM2、KM3 全部断开,K 闭合。启动电阻  $R_{st1}$ 、 $R_{st2}$ 、 $R_{st3}$  全部串入转子回路中,转子每一相的电阻为总电阻。启动瞬间,转速  $n=0$ ,电磁转矩  $T_{em}=T_1$ ,由于  $T_1$  大于负载转矩  $T_L$ ,于是电动机从  $a$  点开始沿曲线 A 加速,对应的机械特性曲线如图 3-20 所示。

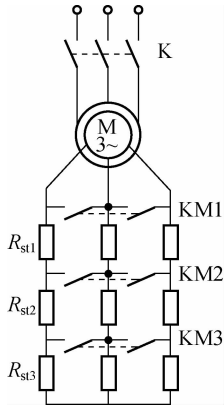


图 3-19 转子串联电阻启动接线图

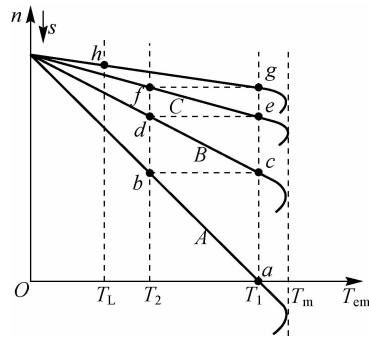


图 3-20 电动机串联电阻启动的机械特性

(2)随着  $n$  的增大, $T_{em}$  逐渐减小,当电动机加速到  $b$  点时, $T_{em}=T_2$ ,触头 KM3 闭合,切除电阻  $R_{st3}$ ,由于转速不能突变,因此,工作点水平过渡到  $c$  点。

(3)由于  $T_1 > T_L$ ,于是电动机从  $c$  点开始沿曲线 B 继续加速,到达  $d$  点时,触头 KM2 闭合,切除电阻  $R_{st2}$ ,由于转速不能突变,因此,工作点水平过渡到  $e$  点。

(4)同样,由于  $T_1 > T_L$ ,于是电动机从  $e$  点开始沿曲线 C 继续加速,当到达  $f$  点时,触头 KM1 闭合,所有的电阻全部短接,电动机加速到稳定点  $h$  运行,启动过程结束。

采用这种方法启动,既可以限制启动时转子及定子的电流,又可以增大启动转矩(一般为最大电磁转矩的 0.7~0.85 倍),减小启动时间。一般用于容量较大的电动机启动,但其结构比较复杂且造价高。

### 2. 转子串联频敏变阻器启动

转子串联电阻启动的绕线型异步电动机,当功率较大时,转子电流很大。若想在启动过程中有较大的启动转矩且保持启动平稳,则必须串联较多的电阻,导致设备的结构复杂而且造价昂贵。如果采用频敏变阻器代替启动电阻,则可克服上述缺点。

频敏变阻器  $R_{FP}$  是一个铁损耗很大的三相电抗器,其铁芯由钢板或铁板叠成,铁芯结构像一个没有二次绕组的三相心式变压器铁芯,3 个绕组分别绕在 3 个铁芯柱上并作星形连接。频敏变阻器是一种无触头的电磁元件,因其等效电阻与频率成正比变化,故称为频敏变阻器。





转子串联频敏变阻器启动接线图如图 3-21 所示。启动时,断开触头 KM2,转子接入频敏变阻器。当触头 KM1 闭合时,电动机接通电源开始启动。启动瞬间,转子频率较高,频敏变阻器内部的涡流损耗与频率平方成正比,反应铁损耗大小的等效电阻也较大,相当于转子回路串入一个较大的电阻,起到了限制启动电流及增大启动转矩的作用。随着转速的上升,转子频率不断下降,铁损耗逐渐减小,等效电阻也随之减小,使启动过程平稳。当启动过程结束后,触头 KM2 闭合,切除频敏变阻器。

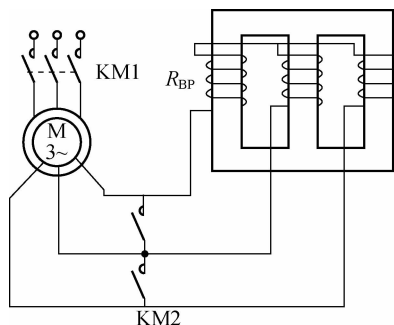


图 3-21 转子串联频敏变阻器启动接线图

转子串联频敏变阻器启动的特点是结构简单,价格便宜,运行可靠,而且在启动过程中能自动且平滑地减小电阻,因此,得到了广泛的使用。

## 学习情境七 三相异步电动机的制动

电动机的制动状态是指其电磁转矩  $T_{em}$  与转子转动的方向相反的运行状态。电动机运行于制动状态时,吸收机械能并转换为电能,该电能消耗在电动机内部或反馈回电网。常见的制动方法有能耗制动、反接制动和回馈制动。

### 一、三相异步电动机能耗制动

如图 3-22 所示为能耗制动原理。制动时,将运行着的异步电动机的定子绕组从三相交流电源上断开,然后立即接到直流电源上。用断开 KM1,闭合 KM2 来实现。

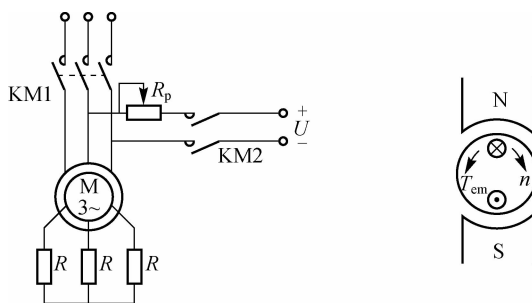


图 3-22 三相异步电动机能耗制动原理

当三相异步电动机的定子绕组断开三相交流电源而接入直流电时,定子绕组便产生一个恒定的磁场。而转子由于惯性会继续旋转,从而切割恒定磁场产生感应电动势和感应电

流,其方向可用右手定则判定。同时,由于转子铁芯电流与磁场相互作用而产生同旋转方向相反的制动转矩,使电动机迅速停车。当电动机的转速下降到零时,转子感应电动势和感应电流均为零,此时制动过程结束。由于这种方法是用消耗转子的动能(转换成电能)来进行制动的,因此,称为能耗制动,其机械特性曲线如图 3-23 所示。

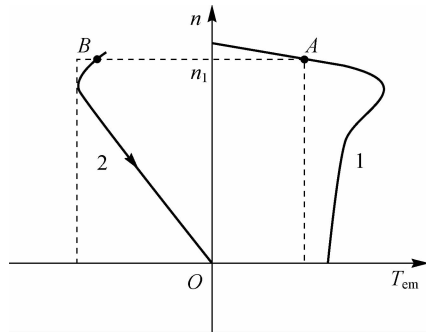


图 3-23 三相异步电动机能耗制动的机械特性

由能耗制动时的机械特性曲线可以看出,电动机原来工作在固有机械特性曲线 1 的 A 点,在制动瞬间,电磁转矩与 A 点的电磁转矩方向相反,且由于转速不能突变,故其工作点由 A 点向能耗制动曲线 2 上的 B 点移动。当到达 B 点时,由于电磁转矩与转子转向相反,电动机便开始减速,即沿曲线 2 开始下移,直到原点,从而实现制动。

因为产生制动转矩的磁场是由于定子绕组接入直流电流而产生的,所以通过调节直流电流的大小,可以控制制动转矩的大小。一般情况,直流电流可调节为额定电流的 0.5~1 倍。

能耗制动的优点是制动平稳,能实现快速停车,缺点是必须配有专门的直流电源。适用于位能性负载匀速下放及电动机的准确、快速停车。

## 二、三相异步电动机反接制动

### 1. 电源反接制动

电源反接制动是指将三相异步电动机的任意两相定子绕组的电源线对调,即断开 KM1,闭合 KM2,如图 3-24 所示。此时定子产生的旋转磁场的方向会随着电源的反接而反向,电磁转矩的方向也随之反向,由于机械惯性,电动机转速未变,从而起到制动的作用,电源反接制动的机械特性曲线如图 3-25 所示。

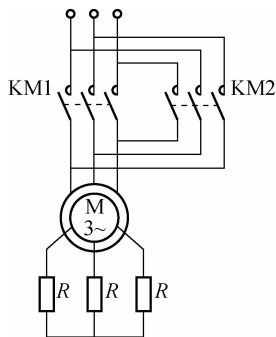


图 3-24 三相异步电动机电源反接制动原理

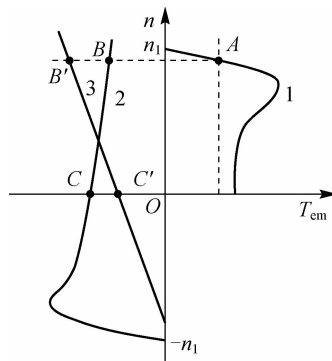


图 3-25 三相异步电动机电源反接制动的机械特性



由电源反接制动的机械特性曲线可知,在定子绕组电源线反接的瞬间,电源相序反向,旋转磁场、电磁转矩也随之反向(此时电动机的转差率大于1),由于机械惯性转速不能突变,工作点由曲线1的A点平移到曲线2的B点,此时由于电磁转矩反向,故电动机开始减速并沿着曲线2下降,当到达C点时转速为零,制动过程结束。此时应立即切断电源,否则电动机会反转。一般为了限制制动过程中的电流和增大制动转矩,常在绕线型异步电动机中串入制动电阻。绕线型异步电动机电源反接制动时的机械特性如曲线3所示。

## 2. 倒拉反接制动

倒拉反接制动适用于绕线型异步电动机拖动位能性负载的低速下放,也称为转子反向反接制动,倒拉反接制动的机械特性如图3-26所示。

设电动机原来工作在曲线1的A点,即处于正向电动状态。如果在转子回路中串入电阻,其机械特性曲线变为图中曲线2。在转子串入电阻瞬间,由于转速不能突变,工作点由A平移到B点,此时电动机的转子电流和电磁转矩减小,电磁转矩  $T_{em} < T_L$ 。电动机开始减速,工作点由B向C移动。当转速减小到零时,电磁转矩  $T_{em}$  仍然小于负载转矩  $T_L$ 。此时,由于位能性负载的作用,电动机将反转,直至电动机的电磁转矩等于负载转矩,电动机稳定运行于图中D点。由于整个过程实际上是在重力作用下负载下放的过程,因此,将这种制动方法称为倒拉反接制动。此时,由于电动机转子反向转动,因此,转差率为

$$s = \frac{n_1 - (-n)}{n_1} = \frac{n_1 + n}{n_1} > 1$$

即转差率大于1。

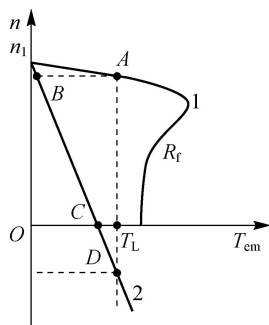


图 3-26 三相异步电动机倒拉反接制动的机械特性

## 三、三相异步电动机回馈制动

在电动机工作过程中,由于位能性负载的作用,可使电动机的转速超过旋转磁场的同步转速,此时电动机转子铁芯与旋转磁场的相对切割方向同电动机运行状态时相反,则转子电流和电磁转矩的方向也相反,即电磁转矩方向与转子旋转方向相反,电磁转矩变为制动转矩。电动机作为发电机运行,将机械功率变成电功率向电网输送电能,因此,称为回馈制动,也称为再生发电制动。

回馈制动常分为正向回馈制动和反向回馈制动。

### 1. 正向回馈制动

如图3-27所示为正向回馈制动的机械特性曲线,正向回馈制动常用于变极或变频调速中。设原来电动机稳定运行于曲线1上的A点,变极或变频调速时,由于转速不能突变,因

此, 工作点由  $A$  点平移到曲线 2 上的  $B$  点。在  $B$  点转速  $n_B > 0$ , 电磁转矩  $T_B < 0$ , 为制动转矩, 且由于  $n_B > n'_1$ , 电动机处于回馈制动状态。此时电动机开始减速, 从曲线 2 中的  $B$  点向  $D$  点移动, 这一段变化即为回馈制动过程。在此过程中电动机吸收动能, 并转化为电能回馈到电网, 从  $D$  点到  $C$  点的过程为电动减速过程,  $C$  点为调速后的稳定工作点。

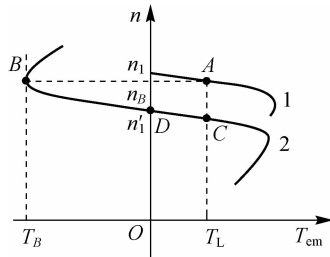


图 3-27 正向回馈制动的机械特性

## 2. 反向回馈制动

如图 3-28 所示为电动机下放重物时反向回馈制动的机械特性曲线。设开始时(提升重物), 电动机运行于曲线 1 上的  $A$  点, 当把电源两相反接后, 定子旋转磁场的同步转速为  $-n_1$ , 机械特性为曲线 2。由于在反接瞬间转速不能突变, 故工作点由  $A$  点向  $B$  点平移进入电源反接制动状态, 转速开始下降, 直至  $C$  点(转速为零)。然后电动机反向启动并开始加速, 工作点由  $C$  点向  $D$  点移动, 到达  $D$  点后, 保持稳定运行, 即重物匀速下放。此时, 电动机把动能转换为电能回馈到电网。

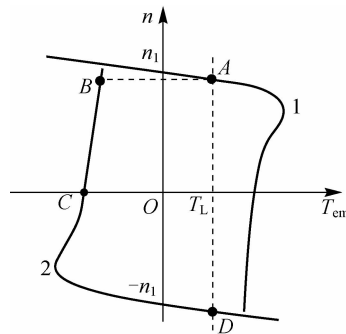


图 3-28 反向回馈制动的机械特性

# 学习情境八 三相异步电动机的调速

调速是指负载不变的情况下人为的调节电动机的转速, 以满足生产过程的需要。根据异步电动机转速的公式  $n = (1-s)n_1 = (1-s)60f_1/p$  可知, 异步电动机调速的方法有改变定子极对数  $p$ 、改变电源频率  $f_1$  和改变转差率  $s$  这 3 种。

## 一、三相异步电动机的变极调速

变极调速是通过改变电动机的定子绕组的极对数  $p$  来调速的, 此方式只适用于笼型异

步电动机。

### 1. 变极原理

一般情况下,通过改变电动机定子绕组的联结方式,即可改变旋转磁场的极对数。但由于磁极是成对变化的,因此,这种调速是有级的,不能连续调节。

由式  $n=(1-s)60f_1/p$  可知,如果极对数  $p$  减小一半,旋转磁场的转速便提高一倍,转子转速差不多也提高一倍,因此,改变极对数  $p$  可以得到不同的转速。

设电动机的定子每相都由两个完全对称的“半相绕组”组成,两个半相绕组头尾串联时,根据线圈中的电流方向,用右手螺旋定则可以判断出磁场的方向。如图 3-29 所示,电动机的定子绕组产生一个  $2p=4$  极的磁场。如果将两个半相绕组尾尾串联或头尾并联时,就形成一个  $2p=2$  极的磁场,如图 3-30 所示。由此可见,通过改变定子中每个半相绕组的电流方向,即可改变极对数。

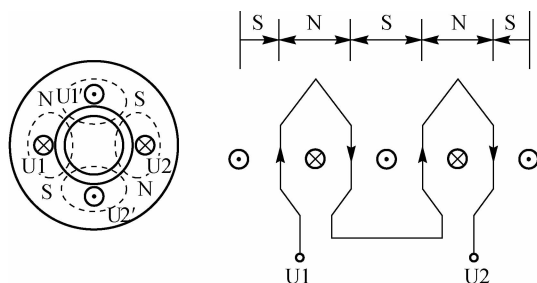


图 3-29  $2p=4$  的绕组变极原理图

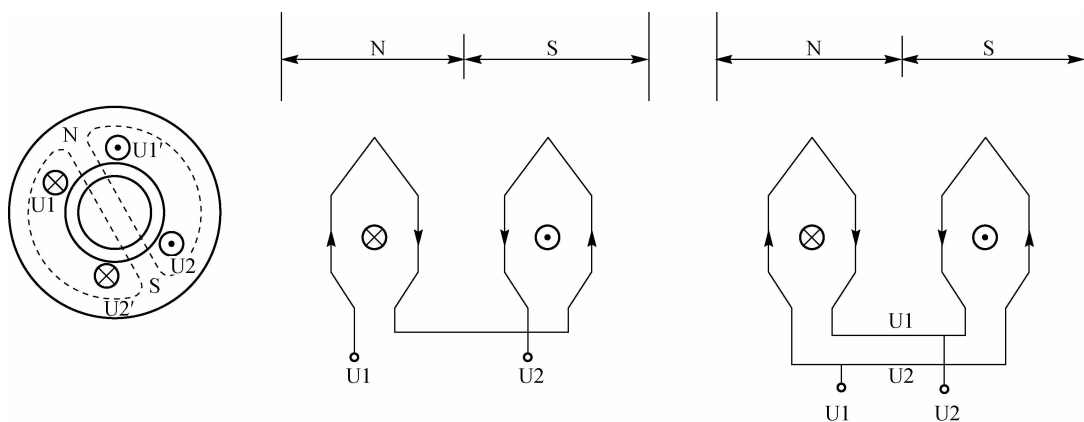


图 3-30  $2p=2$  的绕组变极原理图

常用的改变定子绕组极对数的接法有两种:一是定子绕组从单星形联结改成并联的双星形联结,如图 3-31(a)所示;另一种是从三角形联结改成双星形联结,如图 3-31(b)所示。

应该注意,绕组联结改变后,必须同时改变定子绕组的相序,以保证调速前后电动机的转向相同。因为在  $p=1$  时,三相绕组在空间分布的电角度依次为  $0, 2\pi/3, 4\pi/3$ ;而当  $p=2$  时,三相绕组在空间分布的电角度依次为  $0, (2\pi/3) \times 2 = 4\pi/3, (4\pi/3) \times 2 = 8\pi/3$  (即  $2\pi/3$ )。显然,变极前后三相绕组的相序发生了变化,因此,变极后只有对调定子的两相绕组,才能保证电动机的转向不变。

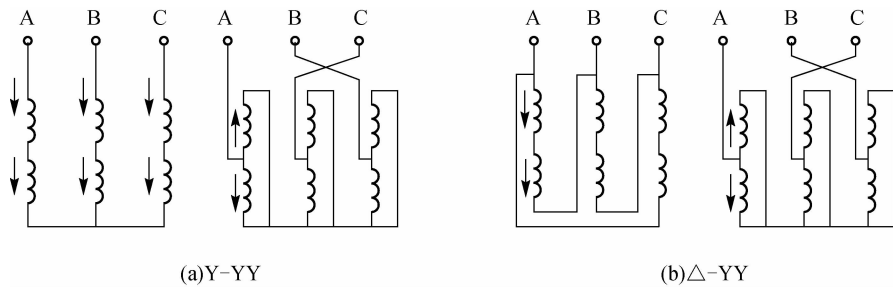


图 3-31 改变定子绕组极对数的联结方式

## 2. 变极调速时的容许输出

变极调速时的容许输出是指在额定电流下,调速前后电动机轴上输出的功率和转矩。

### 1) Y-YY 联结方式

设电源电压为  $U_N$ ,当定子绕组为单星形联结时,电动机的输出功率为

$$P_Y = 3 \frac{U_N}{\sqrt{3}} I_1 \eta \cos \varphi_1 = \sqrt{3} U_N I_1 \eta \cos \varphi_1 \quad (3-54)$$

式中,  $\eta$  为电动机的效率;  $\cos \varphi_1$  为定子功率因数。

改接为双星形联结后,若保证定子绕组相电流  $I_1$ 、电动机效率  $\eta$ 、定子功率因数  $\cos \varphi_1$  不变,则电动机的输出功率为

$$P_{YY} = 3 \frac{U_N}{\sqrt{3}} 2I_1 \eta \cos \varphi_1 = 2\sqrt{3} U_N I_1 \eta \cos \varphi_1 = 2P_Y \quad (3-55)$$

因此,改接前后电动机输出的转矩之比为

$$\left. \begin{aligned} \frac{T_Y}{T_{YY}} &= \frac{9550P_Y}{n_Y} \cdot \frac{n_{YY}}{9550P_{YY}} = 1 \\ \frac{n_Y}{n_{YY}} &= \frac{P_Y}{P_{YY}} = \frac{1}{2} \end{aligned} \right\} \quad (3-56)$$

比较式(3-55)和式(3-56)可知,当定子绕组由单星形联结改成双星形联结时,虽然电动机的输出功率和转速增大一倍,但是电动机的输出转矩却保持不变。

### 2) Δ-YY 联结方式

改接前输出功率为

$$P_{\Delta} = 3 \frac{U_N}{\sqrt{3}} (\sqrt{3} I_1) \eta \cos \varphi_1 = 3U_N I_1 \eta \cos \varphi_1 \quad (3-57)$$

改接成双星形联结后,若保证定子绕组相电流  $I_1$ 、电动机效率  $\eta$ 、定子功率因数  $\cos \varphi_1$  不变,则电动机的输出功率为

$$P_{YY} = 3 \frac{U_N}{\sqrt{3}} 2I_1 \eta \cos \varphi_1 = 2\sqrt{3} U_N I_1 \eta \cos \varphi_1$$

由式(3-55)和式(3-57)可得,改接后与改接前电动机的输出功率之比为

$$\frac{P_{YY}}{P_{\Delta}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.15 \quad (3-58)$$

改接后与改接前电动机输出的转矩之比为



$$\left. \begin{aligned} \frac{T_{YY}}{T_{\Delta}} &= \frac{9\,550P_{YY}}{n_{YY}} \cdot \frac{n_{\Delta}}{9\,550P_{\Delta}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0.58 \\ \frac{n_{YY}}{n_{\Delta}} &= \sqrt{3} \frac{P_{YY}}{P_{\Delta}} = 2 \end{aligned} \right\} \quad (3-59)$$

由上面的分析可知,改接后电动机输出功率基本保持不变,而电动机的转速增加了一倍,转矩则减小了一半。

综上所述,Y-YY 联结方式适用于恒转矩调速, $\Delta$ -YY 联结方式适用于恒功率调速。异步电动机变极调速的优点是简单可靠,成本低,效率高,机械特性硬;缺点是调速时转速几乎是成倍变化的,不能实现均匀平滑的无级调速,且能实现的速度挡也不可能太多。

## 二、三相异步电动机的变频调速

由转速公式  $n=(1-s)n_1=(1-s)60f_1/p$  可知,若改变电源频率  $f_1$ ,则异步电动机的转速  $n$  也随之改变,从而可以达到调节异步电动机转速的目的。

由异步电动机定子的单相电动势有效值的公式(略去定子漏阻抗) $U_s \approx E_s = 4.44 f_1 N_1 K_{w1} \Phi_m$  可知,在调速时,若不改变定子端电压,则随着频率  $f_1$  的减小,主磁通  $\Phi_m$  将增加,使得磁路饱和,励磁电流增大,导致铁损耗增大;当频率  $f_1$  增大时,主磁通  $\Phi_m$  减小,使得电动机的电磁转矩下降。因此,为了使调速过程中电动机的主磁通不变,通常在调节频率  $f_1$  的同时,改变定子电压  $U_1$ ,以保证变频调速前后电动机的运行性能及过载能力不变。

设  $L_1$ 、 $L_2'$  分别为定子、转子绕组的漏电感,单位为 H。由于  $X_1 + X_2' = 2\pi f_1(L_1 + L_2')$ ,且  $f_1$  较高,故式(3-39)可近似等效为

$$T_m \approx C \left( \frac{U_1}{f_1} \right)^2 \quad (3-60)$$

式中, $C$  为常数, $C = \pm m_1 p / [8\pi^2(L_1 + L_2')]$ 。

把式(3-40)代入式(3-60) 可得

$$T_N \approx C \left( \frac{U_1}{\sqrt{\lambda} f_1} \right)^2 \quad (3-61)$$

由式(3-61)可知,若频率改变为  $f_1'$ ,定子相电压、额定转矩及过载能力相应改变为  $U_1'$ 、 $T_N'$  及  $\lambda'$ ,则改变频率后与改变前的额定转矩比为

$$\frac{T_N'}{T_N} = \left( \frac{U_1'}{U_1} \right)^2 \left( \frac{f_1}{f_1'} \right)^2 \frac{\lambda}{\lambda'} \quad (3-62)$$

为了维持电动机变频调速前后的运行性能不变并使过载能力相同,应按下式的规律来调节电动机的频率和电压。

$$\frac{U_1'}{U_1} = \frac{f_1'}{f_1} \sqrt{\frac{T_N'}{T_N}} \quad (3-63)$$

当恒转矩变频调速时,由于  $T_N' = T_N$ ,则式(3-63)可变为

$$\frac{U_1'}{f_1'} = \frac{U_1}{f_1} = \text{常数} \quad (3-64)$$

由式(3-64)可知,当恒转矩调速时,若能保证  $U_1/f_1$  为常数,则可保证在变频调速过程中电动机的过载能力基本不变,同时也可使主磁通  $\Phi_m$  基本不变。

当恒功率变频调速时,由

$$P_N = \frac{T_N n_N}{9\ 550} = \frac{T'_N n'_N}{9\ 550} = \text{常数}$$

得

$$\frac{T'_N}{T_N} = \frac{n_N}{n'_N} = \frac{f_1}{f'_1} \quad (3-65)$$

将式(3-65)代入式(3-63)得

$$\frac{U'_1}{\sqrt{f'_1}} = \frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{常数} \quad (3-66)$$

由式(3-66)可知,当恒功率变频调速时,若能保证电压与频率成正比调节,或  $U_1/\sqrt{f_1}$  为常数,则可保证在变频调速过程中电动机的过载能力基本不变,但主磁通  $\Phi_m$  将发生变化。也就是说,对于恒功率负载,在采用变频调速时,无法使电动机的过载能力和主磁通同时保持不变。

异步电动机变频调速时可分为基频以下调速和基频以上调速两种情况。

当在基频以下调速时,保证  $U_1/f_1$  为常数。频率  $f_1$  相对较小时,  $X_1 + X'_2$  较小。由于定子电阻  $R_1$  的存在,随着频率  $f_1$  的降低,最大电磁转矩将减小。在实际情况下,为了保证电动机在频率较低时有足够大的转矩,可适当使  $U_1$  比  $f_1$  降低的比例小一些。

当在基频以上调速时,频率  $f_1$  从额定频率  $f_N$  开始增大。但是当  $f_1 > f_N$  时,电压  $U_1$  却不能超过额定电压  $U_N$ 。通常,在基频以上调速时应采取保证电压不变的方法,使主磁通  $\Phi_m$  与频率  $f_1$  成反比降低。

变频调速具有调速范围宽、平滑性好等特点。在调节频率时,电压按不同规律变化可实现恒转矩和恒功率调速,以满足不同的生产生活需求。

### 三、三相异步电动机的变转差率调速

常见的绕线型异步电动机改变转差率调速的方法有转子串联电阻调速、串级调速和改变定子电压调速 3 种。

#### 1. 转子串联电阻调速

转子串联电阻调速的方法只适用于绕线型异步电动机,其机械特性曲线如图 3-32 所示。

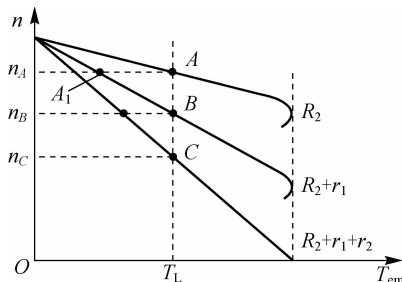


图 3-32 转子串联电阻调速的机械特性

由转子串联电阻调速的机械特性曲线可知,当转子串联附加电阻  $r_1$  后,转子电流减小,转矩也相应减小。由于转速不能突变,因此,工作点由图中 A 点向  $A_1$  点平移。由于  $A_1$  点的转矩  $T_{em} < T_L$ ,因此,电动机开始减速,工作点  $A_1$  点沿曲线下移,当到达 B 点时  $T_{em} = T_L$ ,



稳定运行。由于电动机转速下降,因此,转差率  $s = (n_1 - n) / n_1$  增大,即特性曲线的斜率增大。若负载转矩一定,转子串入更大电阻后,同理可知,工作点由  $B$  点移动到  $C$  点,转速由  $n_B$  变为  $n_C$ 。依次类推,所串电阻越大,电动机的转速越小,电动机的转差率则越大。

由电动机的电磁转矩参数表达式可知,若最大电磁转矩和电压保持不变,则有

$$\frac{R_2}{s_A} = \frac{R_2 + r_1}{s_B} = \text{常数} \quad (3-67)$$

由式(3-67)得调速时的调速电阻表达式为

$$r_1 = \left( \frac{s_B}{s_A} - 1 \right) R_2 \quad (3-68)$$

式中,  $s_A$  为转子串联电阻  $r_1$  前电动机的转差率;  $s_B$  为转子串联电阻  $r_1$  后电动机的转差率;  $R_2$  为电动机转子每相绕组电阻。

转子串联电阻调速的方法具有设备简单、易于实现等优点,但是其不能实现无级调速,而且速度较低时,电动机转差率较大,导致电动机运行效率降低。

## 2. 串级调速

利用转子串联电阻调速,当转速较低时,电动机转差率较大,导致电动机运行效率降低,而串级调速则很好地解决了这一问题。

在转子电路里串接一个与转子电动势  $E_2$  同频率的附加电动势  $E_s$ ,通过改变此附加电动势  $E_s$  的幅值和相位,同样也可以达到调速的目的。串级调速可分为低同步串级调速和超同步串级调速。

### 1) 低同步串级调速

当附加电动势  $E_s$  与转子电动势  $E_2$  相位相反时,电动机在同步转速以下调速的方法称为低同步串级调速。

当串入附加电动势  $E_s$  后,转子电流降低,导致电磁转矩减小,引起电动机转速下降。串入的附加电动势  $E_s$  越大,电动机的转速降得越快。

### 2) 超同步串级调速

当附加电动势  $E_s$  与转子电动势  $E_2$  相位相同、电动机转速在同步转速以上时调速的方法称为超同步串级调速。

当串入附加电动势  $E_s$  后,转子电流增大,导致电磁转矩增大,引起电动机转速增加。串入的附加电动势  $E_s$  越大,电动机的转速增加得越快。

串级调速时,平滑性好,效率高,但其成本较高,且速度较低时电动机的过载能力较低。

## 3. 改变定子电压调速

异步电动机在同步转速与临界转差率保持不变时,输出转矩与定子电压的平方成正比,故通过改变定子电压可实现对电动机调速。

如图 3-33 所示为改变定子电压调速时的机械特性曲线图,如曲线 1 所示,对于恒转矩负载,改变定子电压的调速范围较小,不同电压时的工作点分别为  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$ 。如曲线 2 所示,对于通风机负载,改变定子电压的调速范围较大,电动机在整个机械特性曲线上都能稳定运行,不同电压时的工作点分别为  $A_2$ 、 $B_2$ 、 $C_2$ 。

当电动机恒转矩调速时,往往通过增加转子的电阻来获得较大的调速范围,如图 3-34

所示。但在低速时电动机的机械特性太软,往往不能满足实际生产的要求。而且低压时电动机的过载能力也较低,负载稍大就能使电动机停转。因此,常常采用速度负反馈控制系统,以提高电动机机械特性的硬度,改善电动机在低速时的机械特性。

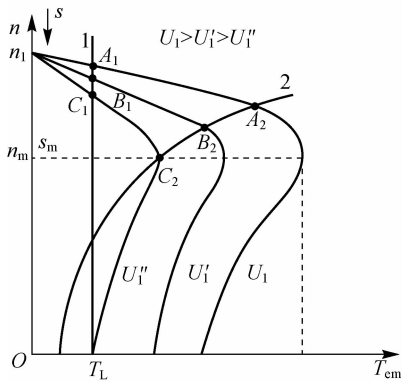


图 3-33 改变定子电压调速时的机械特性

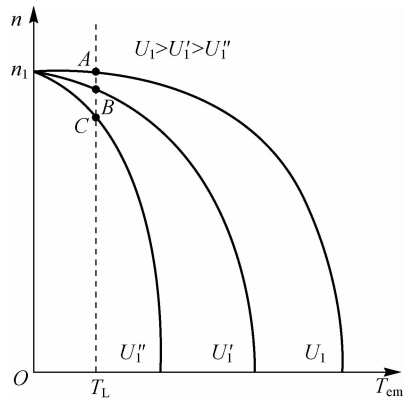


图 3-34 恒转矩调速时的机械特性

采用改变定子电压的方法调速时,设备简单,操作方便且平滑性好。但其稳定性差,电阻耗能大。



## 三相异步电动机的参数测定

在利用三相异步电动机的等效电路来进行工程分析和计算时,必须知道其各项参数,一般可通过空载试验和短路(堵转)试验来测定电动机的各项参数。

### 一、空载试验

#### 1) 实训目的

(1) 学习三相异步电动机的空载参数测定方法。

(2) 通过测定三相异步电动机的空载参数(如空载电压  $U_0$ 、空载电流  $I_0$ 、空载功率  $P_0$ ),来确定电动机的励磁电抗  $X_f$ 、励磁电阻  $R_f$  和空载阻抗  $Z_f$  等参数。

#### 2) 实训仪器和仪表

三相异步电动机、功率表、调压器、电压表和交流毫安表。

#### 3) 实训方法和步骤

(1) 空载试验是在电动机转子转轴不带任何负载,电源频率为额定值的情况下进行的,空载等效电路如图 3-35 所示。

(2) 按照如图 3-36 所示的空载试验电路图连接电路。电动机启动后,先在额定电压下运行几分钟。