

# 交流调压调速系统

交流调速系统就是以交流电动机作为电能—机械能的转换装置,并通过对电能的控制产生所需的转矩与转速。它与直流电动机调速系统最大的不同之处主要是它没有机械换向器。

在 19 世纪 80 年代以前的工业生产中,直流电力拖动是唯一的一种电力拖动方式。到 19 世纪末叶,由于发明了交流电,解决了三相制交流电的输送与分配问题,加之又制成了经济实用的鼠笼型异步电动机,使交流电力拖动在工业中逐步得到了广泛的应用。但是随着生产技术的发展,对电力拖动在起制动、正反转以及调速精度、调速范围等静态特性与动态响应方面提出了新的、更高的要求,而交流电力拖动比直流电力拖动在技术上难以实现这些要求,所以 20 世纪前半叶,在可逆、可调速与高精度的传动技术领域,几乎都采用直流电力拖动系统。

直到 20 世纪 60~70 年代,电力电子技术的发展,特别是大规模集成电路和计算机控制技术以及现代控制理论的应用,为交流电力拖动的发展创造了有利条件,如交流电动机的串级调速、各种类型的变频调速、无换向器电动机调速,使得交流电力拖动逐步具备了宽的调速范围、高的稳速精度、快的动态响应以及可在Ⅳ象限作可逆运行等良好的技术性能。

交流电动机有同步电动机和异步电动机两大类。每种电动机又都有不同类型的调速方法。

异步电动机的调速方法较多,现有文献中介绍的常见方法有:①降电压调速;②电磁转差离合器调速;③绕线转子异步电动机转子串电阻调速;④绕线转子异步电动机串级调速;⑤变极对数调速;⑥变频调速等。在开发交流调速系统的时候,人们从多方面进行探索,其种类繁多是很自然的。现在交流调速的发展已比较成熟,为了深入地掌握其基本原理,就不能满足于这种表面形式的罗列,而要进一步探讨其内在规律,从更高的角度上认识交流调速的本质。

按照交流异步电动机的基本原理,从定子传入转子的电磁功率  $P_{em}$  可分为两部分:一

部分  $P_{\text{mech}} = (1-s)P_{\text{em}}$  是拖动负载的有效功率,称为机械功率;另一部分  $P_s = sP_{\text{em}}$  是传输给转子电路的转差功率,与转差率  $s$  成正比。从能量转换的角度上看,转差功率是否增大、是消耗掉还是得到回收,是评价调速系统效率高低的一种标志。从这点出发,可以把异步电动机的调速系统分成以下 3 大类。

#### (1) 转差功率消耗型调速系统

该系统的全部转差功率都被转换成热能消耗在转子电路上。上述的①、②、③ 3 种调速方法都属于这一类。在 3 类异步电动机调速系统中,这类调速系统的效率最低,而且它以增加转差功率的消耗换取转速的降低(恒转矩负载时),越向下调速效率越低。但这类系统结构最简单,所以还有一定的应用场合。

#### (2) 转差功率回馈型调速系统

这类系统转差功率的一部分被消耗掉,大部分则通过变流装置回馈给电网或者转化为机械能予以利用,转速越低时回收的功率也越多,上述调速方法④的串级调速属于这一类。这类调速系统的效率比较高,但需增加一些设备。

#### (3) 转差功率不变型调速系统

这类系统的转差功率中转子铜损部分的消耗是不可避免的,但在这类系统中,无论转速高低,转差功率的消耗基本不变,因此效率最高。上述的⑤、⑥两种调速方法属于此类。其中变极对数只能有级调速,应用场合有限。只有变频调速应用最广,可以构成高动态性能的交流调速系统,取代直流调速,但在定子电路中须配备与电动机容量相当的变频器,相比之下,设备成本较高。

同步电动机没有转差,也就没有转差功率,所以同步电动机调速系统只能是转差功率不变型的,而同步电动机转子极对数又是固定的,因此只能靠变压变频调速,没有像异步电动机那样的多种调速方法。在同步电动机的变压变频调速方法中,从频率控制的方式看,可分为他控变频调速和自控变频调速两类。后者利用转子磁极位置的检测信号控制变压变频装置换相,类似于直流电动机中电刷和换向器的作用,因此有时又称为无换向器电动机调速或无刷直流电动机调速。

## 5.1 异步电动机改变电压时的机械特性

根据电机学原理,在忽略空间和时间谐波、忽略磁饱和以及忽略铁损等假定条件下,异步电动机的稳态等效电路如图 5-1 所示。

图中  $R_1$ 、 $R'_2$  分别为定子每相电阻和折合到定子侧的转子每相电阻;  $L_1$ 、 $L'_2$  分别为定子每相漏感和折合到定子侧的转子每相漏感;  $L_m$  为定子每相绕组产生气隙主磁通的等效电感,即励磁电感;  $U_1$ 、 $\omega_1$  分别为电动机定子相电压和供电电源角频率;  $s$  为转

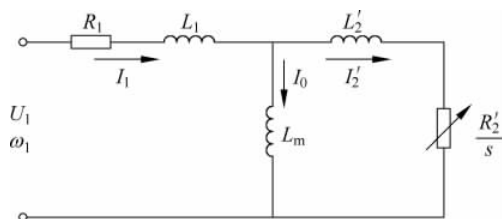


图 5-1 异步电动机的稳态等效电路

差率。

由图 5-1 可以求出

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + C_1 \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \omega_1^2 (L_1 + C_1 L_2')^2}} \quad (5-1)$$

式中,  $C_1 = 1 + \frac{R_1 + j\omega_1 L_1}{j\omega_1 L_m} \approx 1 + \frac{L_1}{L_m}$ 。

在一般情况下,  $L_m \gg L_1$ , 则  $C_1 \approx 1$ , 相当于忽略励磁电流, 这样式(5-1)可简化成

$$I_1 \approx I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \omega_1^2 (L_1 + L_2')^2}} \quad (5-2)$$

令电磁功率  $P_{em} = 3I_2'^2 \frac{R_2'}{s}$ , 同步角速度  $\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p}$ ,  $p$  为电动机极对数, 则异步电动机的电磁转矩为

$$T = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{3p I_2'^2 \frac{R_2'}{s}}{\omega_1} = \frac{3p U_1^2 R_2' / s}{\omega_1 \left[ \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \omega_1^2 (L_1 + L_2')^2 \right]} \quad (5-3)$$

式(5-3)就是异步电动机的机械特性方程式。它表明, 当转速或转差率一定时, 电磁转矩与定子电压的平方成正比。这样可以得到不同电压下的机械特性曲线, 如图 5-2 所示。

将式(5-3)对  $s$  求导, 并令  $dT/ds=0$ , 可求出最大转矩及其对应的转差率

$$s_m = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + \omega_1^2 (L_1 + L_2')^2}} \quad (5-4)$$

$$T_m = \frac{3p U_1^2}{2\omega_1 \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + \omega_1^2 (L_1 + L_2')^2} \right]} \quad (5-5)$$

由图 5-2 可见, 带恒转矩负载  $T_L$  时, 普通的笼型异步电动机改变电压时的稳定工作点为 A、B、C, 转差率  $s$  的变化范围为  $0 \sim s_m$ , 调速范围很小。如果带风机类负载运行, 则工作点为 D、E、F, 调速范围大一些。为了能在恒转矩负载下扩大变压调速范围, 并使电

电动机能在较低转速下运行而不致过热,要求电动机转子有较高的电阻值,其变电压时的机械特性如图 5-3 所示。显然,带恒转矩负载时的变压调速范围增大了,即使堵转工作也不致烧坏电动机,这种电动机又称为交流力矩电动机。

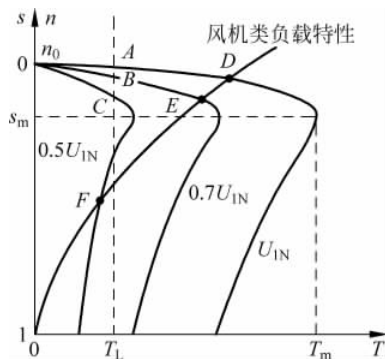


图 5-2 异步电动机改变定子电压时的机械特性

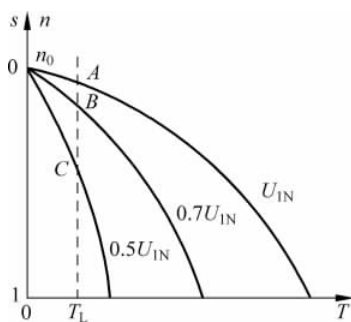


图 5-3 高转子电阻电动机在不同电压下的机械特性

## 5.2 异步电动机变压调速电路

变压调速是异步电动机调速方法中比较简单的一种。

改变定子电压,过去曾采用在异步电动机定子回路中串入饱和电抗器或用三相调压变压器的方法,这种调压方法简单可靠,投资少,但所用的调压设备庞大笨重,电磁惯性大,系统的动态特性差。随着电力电子技术的发展,现在一般都采用由晶闸管或其他功率开关元件构成的交流调压器。

三相交流调压电路的接线形式很多,且各具特点,在交流调速系统中,常用 3 对反并

联晶闸管或3个双向晶闸管接在三相电源和电动机三相绕组之间,三相绕组可以接成星形也可接成三角形,其电路如图5-4所示。

图5-5所示为采用晶闸管反并联的异步电动机可逆和制动电路。其中,晶闸管1~6控制电动机正转运行,反转时,可由晶闸管1、4和7~10提供逆相序电源,同时也可用于反接制动。当需要能耗制动时,可以根据制动电路的要求选择某几个晶闸管不对称地工作。例如让1、2、6这3个器件导通,其余均关断,就可使定子绕组中流过半波直流电流,对旋转着的电动机转子产生制动作用。必要时,还可以在制动电路中串入电阻以限制制动电流。

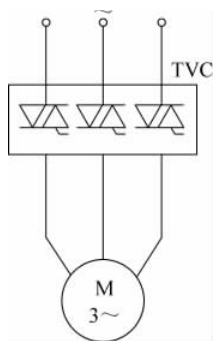


图 5-4 利用晶闸管交流调压器变压调速 TVC-双向晶闸管交流调压器

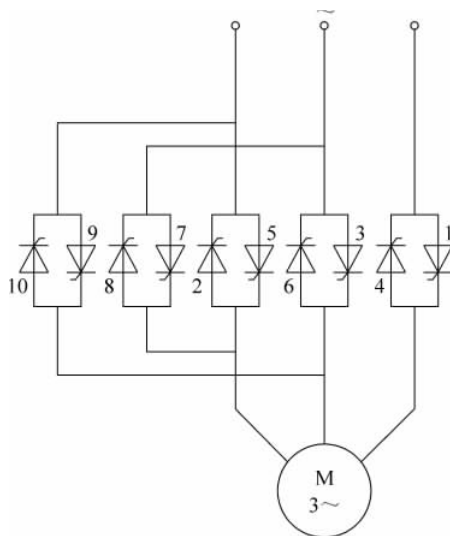


图 5-5 采用晶闸管反并联的异步电动机可逆和制动电路

## 5.3 闭环控制的调压调速系统及其特性

### 5.3.1 具有速度反馈的调压调速系统及其静特性

异步电动机改变电压调速时,采用普通电动机的调速范围很窄,采用高转子电阻的力矩电动机可以增大调速范围,但机械特性太软,当负载变化时静差率很大,开环控制不能得到满意的调速性能。为扩大调速范围,提高调速精度,对于恒转矩性质的负载以及调速

范围在 2 : 1 以上的生产机械的调压调速系统, 往往采用转速负反馈闭环控制系统, 如图 5-6(a) 所示。

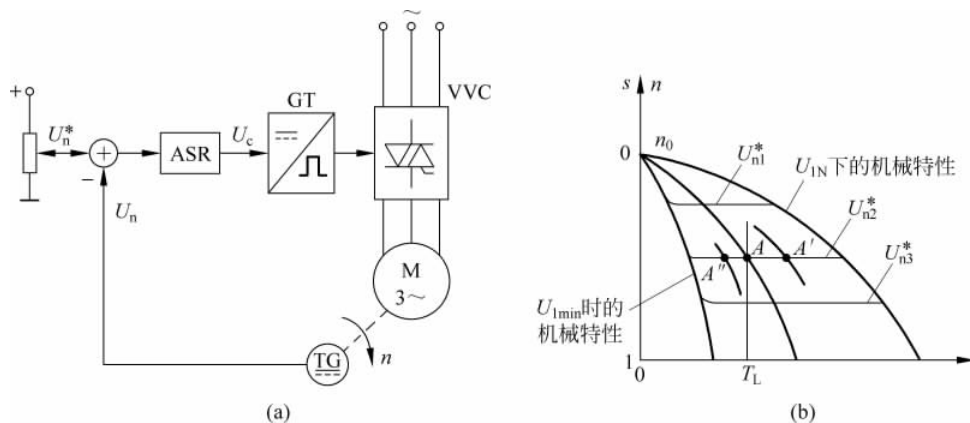


图 5-6 带转速负反馈闭环控制的交流调压调速系统

(a) 原理图; (b) 静特性

带转速负反馈闭环控制的交流调压调速系统的静特性如图 5-6(b) 所示, 如果系统带负载  $T_L$  在 A 点运行, 当负载增大引起转速下降时, 反馈控制作用使定子电压提高, 从而在新的机械特性上找到工作点 A'。同理, 当负载减小时, 也会得到定子电压低一些的新工作点 A'', 将工作点 A''、A、A' 连接起来, 便是闭环系统的静特性, 如果转速调节器为 PI 调节器, 则可以做到无静差。改变速度给定信号  $U_n^*$ , 则静特性平行地上下移动, 达到调速的目的。

与直流变压调速系统不同的是, 额定电压  $U_{1N}$  下的机械特性和最小输出电压  $U_{1min}$  下的机械特性是闭环系统静特性左右两边的极限, 当负载变化达到两侧的极限时, 闭环系统便失去控制能力, 回到开环机械特性上工作。

根据图 5-6(a) 所示的系统可以画出其静态结构图如图 5-7 所示。图中  $K_s = U_1 / U_c$ , 为晶闸管交流调压器和触发装置的放大系数;  $\alpha = U_n / n$ , 为转速反馈系数; ASR 采用 PI 调节器;  $n = f(U_1, T)$  是式 (5-3) 所表达的异步电动机机械特性方程式, 是一个非线性函数。

稳态时,  $U_n^* = U_n = \alpha n$ ,  $T = T_L$ , 根据负载需要的  $n$  和  $T_L$  可由式 (5-3) 计算出所需的  $U_1$  以及相应的  $U_c$ 。

### 5.3.2 闭环变压调速系统的动态结构图

对系统进行动态分析和设计时, 首先需绘出动态结构图。由图 5-7 可以直接画出动

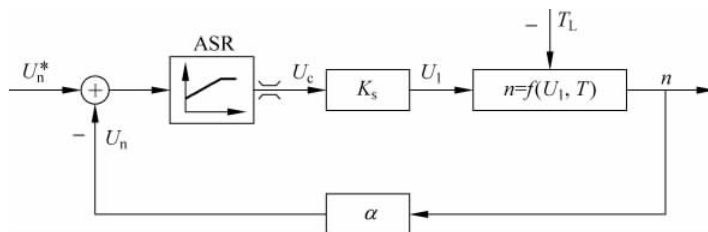


图 5-7 异步电动机闭环变压调速系统的静态结构图

态结构图,如图 5-8 所示。

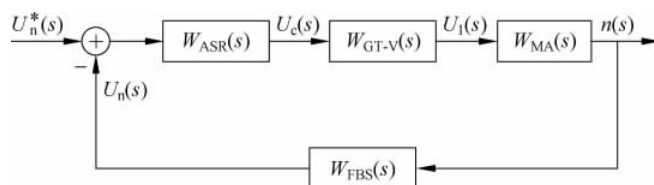


图 5-8 异步电动机闭环变压调速系统的动态结构图

图中各环节的传递函数可分别求出。

### (1) 转速调节器

转速调节器 ASR 常用 PI 调节器,用以消除静差并改善动态性能,其传递函数为

$$W_{ASR}(s) = K_n \frac{\tau_n s + 1}{\tau_n s}$$

### (2) 晶闸管交流调压器和触发装置 GT-V

晶闸管交流调压器和触发装置的输入-输出关系原则上是非线性的,在一定范围内可假定为线性的,在动态中可以近似成一阶惯性环节,正如晶闸管触发与整流装置,其传递函数为

$$W_{GT-V}(s) = \frac{K_s}{T_s s + 1}$$

近似条件是  $\omega_c \leq \frac{1}{3T_s}$ ,对于三相全波 Y 连接调压电路,可取  $T_s = 3.3\text{ms}$ 。对其他形式的调压电路则须另行考虑。

### (3) 测速反馈环节 FBS

考虑到反馈滤波的作用,其传递函数可写成

$$W_{FBS}(s) = \frac{\alpha}{T_{on}s + 1}$$

## (4) 异步电动机

由于描述异步电动机动态过程的是一组非线性微分方程,要用一个传递函数准确地表示异步电动机在整个调速范围内的输入-输出关系是不可能的。这里可先在一定的假定条件下,用稳态工作点附近的微偏线性比的方法,求出一个近似的传递函数。

由式(5-3)已知电磁转矩为

$$T = \frac{3pU_1^2 R'_2 / s}{\omega_1 \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \omega_1^2 (L_1 + L'_2)^2 \right]}$$

当  $s$  很小时,可以认为

$$R_1 \ll \frac{R'_2}{s}$$

且

$$\omega_1 (L_1 + L_2) \ll \frac{R'_2}{s}$$

后者相当于忽略异步电动机的漏感电磁惯性。在此条件下,

$$T \approx \frac{3p}{\omega_1 R'_2} U_1^2 s \quad (5-6)$$

这就是在上述条件下异步电动机近似的机械特性。

设  $A$  为近似机械特性上的一个稳定工作点,则有

$$T_A \approx \frac{3p}{\omega_1 R'_2} U_{1A}^2 s_A \quad (5-7)$$

在  $A$  点附近有微小偏差时,  $T = T_A + \Delta T$ ,  $U_1 = U_{1A} + \Delta U_1$ ,  $s = s_A + \Delta s$ ,代入式(5-6)得

$$T_A + \Delta T \approx \frac{3p}{\omega_1 R'_2} (U_{1A} + \Delta U_1)^2 (s_A + \Delta s) \quad (5-8)$$

将式展开,并忽略两个和两个以上微偏量的乘积,则

$$T_A + \Delta T \approx \frac{3p}{\omega_1 R'_2} (U_{1A}^2 s_A + 2U_{1A} s_A \Delta U_1 + U_{1A}^2 \Delta s) \quad (5-9)$$

式(5-9)减去式(5-7),得

$$\Delta T \approx \frac{3p}{\omega_1 R'_2} (2U_{1A} s_A \Delta U_1 + U_{1A}^2 \Delta s) \quad (5-10)$$

已知转差率  $s = 1 - (\omega / \omega_1)$ ,其中  $\omega_1$  是同步角速度, $\omega$  是转子角速度,则

$$\Delta s = -\frac{\Delta \omega}{\omega_1} \quad (5-11)$$

将式(5-11)代入式(5-10),得

$$\Delta T \approx \frac{3p}{\omega_1 R'_2} \left( 2U_{1A} s_A \Delta U_1 - \frac{U_{1A}^2}{\omega_1} \Delta \omega \right) \quad (5-12)$$

式(5-12)就是在稳定工作点附近微偏量  $\Delta T$  与  $\Delta U_1$ 、 $\Delta \omega$  间的关系。

电力拖动系统的运动方程式为



$$T - T_L = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt}$$

按上面相同的方法处理,可得在稳态工作点 A 附近的微偏量运动方程式为

$$\Delta T - \Delta T_L = \frac{J}{p} \frac{d(\Delta\omega)}{dt} \quad (5-13)$$

利用式(5-12)和式(5-13)的关系,可画出异步电动机在忽略电磁惯性下的微偏线性化结构图,如图 5-9 所示。

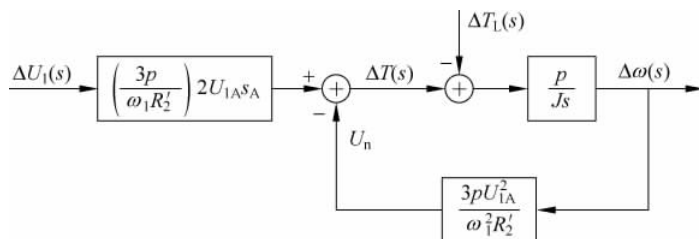


图 5-9 异步电动机的微偏线性近似动态结构图

如果只考虑  $\Delta U_1$  到  $\Delta\omega$  之间的传递函数,可先取  $\Delta T_L = 0$ ,图 5-9 中小闭环传递函数可变换成

$$\frac{\frac{p}{Js}}{1 + \frac{3pU_{1A}^2}{\omega_1^2 R_2'} \frac{p}{Js}} = \frac{1}{\frac{p}{Js} + \frac{3pU_{1A}^2}{\omega_1^2 R_2'}}$$

于是,异步电动机的近似线性化传递函数为

$$W_{MA}(s) = \frac{\Delta\omega(s)}{\Delta U_1(s)} = \frac{\left(\frac{3p}{\omega_1 R_2'}\right) 2U_{1A} s A}{\frac{p}{Js} + \frac{3pU_{1A}^2}{\omega_1^2 R_2'}} = \frac{\frac{2s_A \omega_1}{U_{1A}}}{\frac{J\omega_1^2 R_2'}{3p^2 U_{1A}^2} s + 1} = \frac{K_{MA}}{T_m s + 1} \quad (5-14)$$

式中,  $K_{MA}$  为异步电动机的传递系数,  $K_{MA} = \frac{2s_A \omega_1}{U_{1A}} = \frac{2(\omega_1 - \omega_A)}{U_{1A}}$ ;  $T_m$  为异步电动机拖动

系统的机电时间常数,  $T_m = \frac{J\omega_1^2 R_2'}{3p^2 U_{1A}^2}$ 。

由于忽略了电磁惯性,只剩下同轴旋转体的机电惯性,异步电动机便近似成一个一阶线性惯性环节。

把上述 4 个环节的传递函数写入图 5-8 各方框内,即得异步电动机变压调速系统微偏线性化的近似动态结构图。

在使用上面得出的动态结构图时需要注意以下两点。

(1) 由于它是微偏线性化模型,只能用于机械特性线性段上工作点附近稳定性的判

别和动态校正,不适用于大范围起制动时动态响应指标的计算。

(2) 由于忽略了电动机的电磁惯性,分析和计算结果是比较粗略的。

## 思考题与习题

**5-1** 异步电动机从定子传入转子的电磁功率  $P_{em}$  中,有一部分是与转差率成正比的转差功率  $P_s$ ,根据对  $P_s$  处理方式的不同,可把交流调速系统分成哪几类? 举例说明。

**5-2** 异步电动机改变定子电压调速和直流电动机改变电枢电压调速是不是性质相同的两种调速方式? 为什么?

**5-3** 如果转速闭环调压调速系统采用与直流调速系统相似的双闭环结构,是否具有与直流调速系统一样的静、动态性能?

**5-4** 交流调压调速系统有哪些优缺点? 适用于哪些场合?

**5-5** 当忽略电动机定子损耗和转子轴上损耗后,试写出异步电动机调压调速系统效率的近似表达式,并说明调压调速系统适用于何种特性的负载? 为什么?

**5-6** 晶闸管交流调压调速系统中,对触发脉冲有何要求? 为什么?