

可控硅串级调速系统及其应用

厉无咎 李海东 王 见 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书从异步电动机工作原理着手,分析了可控硅串级调速系统的工作原理、机械特性、效率、功率因数、动态整定等,并结合国内现有装置详细介绍了它的原理电路、参考计算。并对提高串级调速系统的功率因数、减少谐波、瞬时停电保护等专题进行了详尽探讨,还详细介绍了泵和风机的调速节能方法。

可控硅串级调速系统及其应用

厉无咎 李海东 王 见 编著

上海交通大学出版社出版

(上海淮海中路1984弄19号)

吴江伟业印刷厂印刷

新华书店上海发行所发行

787×1092毫米 1/32 印张:7.625 字数:183千字

1985年12月第一版 1986年8月第一次印刷

印数:1—1,5000 定价:1.50元

统一书号:15324·184 科技书目:121-184

目 录

第一章 异步电动机的运行原理和机械特性

第一节 三相异步电动机的运行原理	1
第二节 异步电动机的等值电路	5
第三节 异步电动机的机械特性	8

第二章 可控硅串级调速的基本原理和特性

第一节 可控硅串级调速的基本工作原理	18
第二节 串级调速系统中电动机的转子电压和电流	26
第三节 可控硅串级调速系统的机械特性	37
第四节 异步电动机可控硅串级调速系统机械特性计算举例	47
第五节 可控硅串级调速系统的效率	52
第六节 可控硅串级调速系统主回路设备的参数计算	54

第三章 可控硅串级调速装置的电气控制电路

第一节 可控硅串级调速装置的主回路	65
第二节 可控硅串级调速装置的继电操作电路	69
第三节 可控硅串级调速装置的调节系统	72
第四节 可控硅串级调速装置的控制单元	78
第五节 三相零式串级调速装置	93

第四章 异步电动机可控硅串级调速系统的动态校正

第一节 异步电动机在转子反电势作用下的电磁机械过渡过程	96
第二节 异步电动机可控硅串级调速系统的数学模型及其闭环系统 调节器的设计	105

第五章 改善可控硅串级调速系统的功率因数以及防止瞬时停电事故的措施

第一节 可控硅串级调速系统的功率因数	118
--------------------------	-----

第二节	不对称触发的相控变流器	127
第三节	三相四线桥式变流器	137
第四节	由带分接头的变压器供电的二组桥式变流器	149
第五节	用强迫换相逆变器改善串级调速系统的功率因数	154
第六节	斩波式逆变器串级调速装置	164
第七节	瞬时停电的保护	174
第六章	可控硅串级调速在泵和风机节能技术改造中的应用	
第一节	泵和风机的特性	180
第二节	泵和风机的节电方法	189
第三节	泵和风机采用可控硅串级调速时电动机容量的选择	201
第七章	可控硅串级调速装置的选用、调试和维修	
第一节	可控硅串级调速装置的选用	209
第二节	可控硅串级调速装置的调试	211
第三节	可控硅串级调速装置的常见故障与维修	218
第四节	三相零式串级调速装置的调试与维修	220
附录 1	典型系统的参数和动态性能指标的关系	222
附录 2	TJC 系列可控硅串级调速装置简介	225
本书常用符号一览表		230
参考文献		234

第 一 章

异步电动机的运行原理和机械特性

第一节 三相异步电动机的运行原理

三相异步电动机是一种直接利用工频三相交流电工作的电机，它主要由静止的定子和转动的转子两大部分组成，如图 1-1 所示。

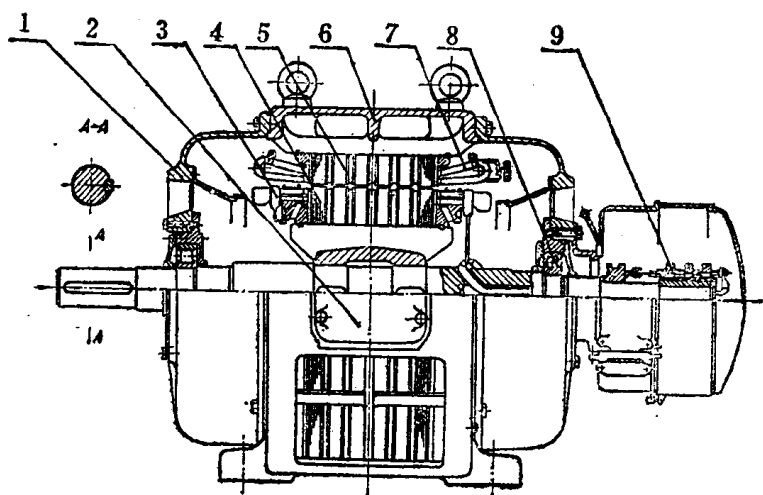


图 1-1 JR 系列三相绕线型异步电动机的结构

1. 端盖； 2. 出线盒； 3. 转子绕组； 4. 转子铁芯；
5. 定子铁芯； 6. 机座； 7. 定子绕组； 8. 轴承； 9. 集电环

就两极异步电动机来说，在定子铁芯内圆的圆周上有三个彼

此相隔 120° 分布相互对称的绕组 $A-X$ 、 $B-Y$ 、 $C-Z$ ，在此三相绕组中通以对称三相电流时可产生一旋转磁场，该旋转磁场与由它在转子绕组内所感生的电流相互作用，便产生电磁力矩拖动转子旋转。

这个旋转磁场是如何产生的呢？请参看图 1-2，在图 1-2 的上部示出了三相电流随时间变化的曲线，各相电流的瞬时值表达式为

$$i_{1A} = I_{1m} \cos \omega t \quad (1-1)$$

$$i_{1B} = I_{1m} \cos (\omega t - 120^\circ) \quad (1-2)$$

$$i_{1C} = I_{1m} \cos (\omega t - 240^\circ) \quad (1-3)$$

在该图的中部示出了 $\omega t = 0^\circ$ 、 120° 、 240° 和 360° 四个时刻定子各相绕组电流流动情况及其合成磁场。该示意图规定电流为正时，电流从绕组的首端 (A 、 B 、 C) 流出，从绕组末端 (X 、 Y 、 Z) 流入，电流为负则相反，并用符号 $\odot$ 表示电流流出，符号 $\otimes$ 表示电流流入。在该图的下部示出了相应各绕组的磁通向量图，各绕组磁路参数相同，由某一绕组产生的磁通 ϕ 正比于该绕组中流过的电流 I_1 ，且各绕组磁通之间的比例等于它们的电流之间的比例，磁通向量的方向垂直于产生该磁通的绕组的平面。例如在 $\omega t = 0$ 时刻， $i_{1A} = I_{1m}$ ， $i_{1B} = i_{1C} = -I_{1m}/2$ ，则 $|\phi_B| = |\phi_C| = |\phi_A|/2$ ，并且 ϕ_B 位于自 ϕ_A 顺时针旋转 60° 的位置上， ϕ_C 位于自 ϕ_A 逆时针旋转 60° 的位置上，合成磁通 ϕ_1 与 ϕ_A 方向一致。由该图可见，当 $\omega t = 120^\circ$ 时，合成磁通 ϕ_1 已从 $\omega t = 0^\circ$ 的位置逆时针转动 120° ，当 $\omega t = 240^\circ$ 时，它又继续转动 120° ，而在 $\omega t = 360^\circ$ 时，它又转到初始位置上，并且合成磁势 ϕ_1 的幅值在各个时刻都保持不变。也就是说，在一对磁极的情况下，三相电流随时间变化经过一个周期 T ，旋转磁场在空间转过 360° (一圈)，因此旋转磁场的转速 n_0 为

$$n_0 = 60/T = 60f_1 (\text{转/分})$$

电流的频率 $f_1 = 1/T$ 。

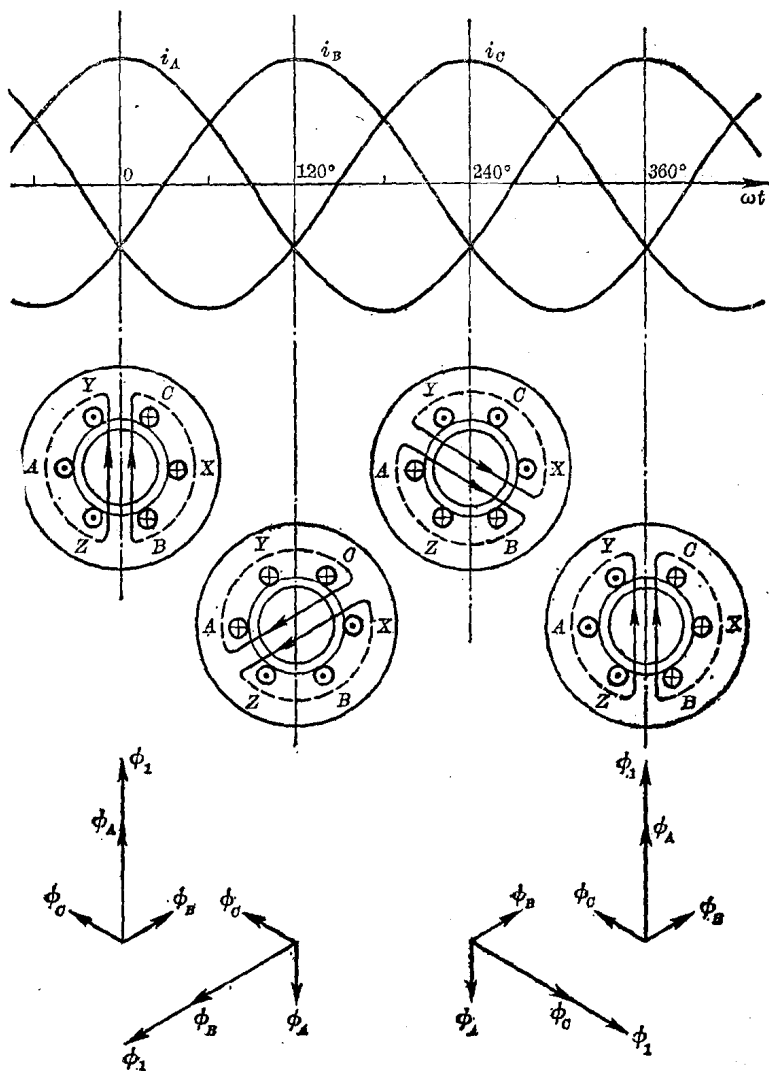


图 1-2 两极异步电动机定子磁场的旋转

在磁场有 p 对极的情况下，每相绕组分别由 p 个线圈串联组成，这时旋转磁场围绕定子圆周转一圈相当于转过 $p \times 360^\circ$ 电角度，因此旋转磁场的转速为

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (\text{转/分}) \quad (1-4)$$

n_0 称为同步转速。

定子绕组产生的旋转磁场以同步转速 n_0 切割转子绕组，根据电磁感应定律，转子绕组中感应出电势和电流。根据电磁力定律，转子电流与旋转磁场相互作用，在转子绕组上产生力和转矩，它使转子按旋转磁场的方向转动。显然，如果转子转速 n 与定子旋转磁场转速 n_0 相等的话，转子绕组与旋转磁场间便无相对运动，从而不会在转子中感应出电势和电流，也就不会有使转子旋转的电磁转矩。因此，异步电动机运行的必要条件是旋转磁场转速 n_0 与转子转速 n 间存在转速差 $(n_0 - n)$ 。我们将转速差 $(n_0 - n)$ 用同步转速 n_0 的百分值表示，称为转差率 s 。

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

如果有外加转矩(原动机或负载)拖动异步电动机转子使它的转速超过同步转速，即 $n > n_0$, $s < 0$ ，则转子绕组与旋转磁场的相对运动方向与前述相反，转子绕组中感应电势和电流的方向就反相，它与旋转磁场相互作用所产生的电磁转矩也跟着反相，该电磁转矩阻碍转子转动，这说明异步电动机从机械负载吸收功率，即把机械功率变为电功率，由定子向电网输送。我们称这种运行状态为发电机状态。

如果有外加转矩拖动异步电动机逆着旋转磁场而转，即 $n < 0$, $s > 1$ ，由于转子绕组与旋转磁场的相对运动方向与前述电动机状态相同，故转子绕组中所感应的电势、电流及其所产生的电磁转矩

均与电动状态相同,但电磁转矩的方向与转子转动方向相反,成为制动转矩。电动机从机械负载吸收功率。又由于这时定子绕组的工作状态也与前述电动机状态时相同,它仍然从电网吸收电功率。这两部分功率一起变为热能消耗在电机绕组上。我们称这种运行状态为反接制动状态。

图 1-3 示出了异步电动机三种运行状态的示意图。

用同样的分析方法可以推知,如将定子三相绕组的外施电压任意两相互换,定子磁场将反向旋转,因而转子也跟着反转。

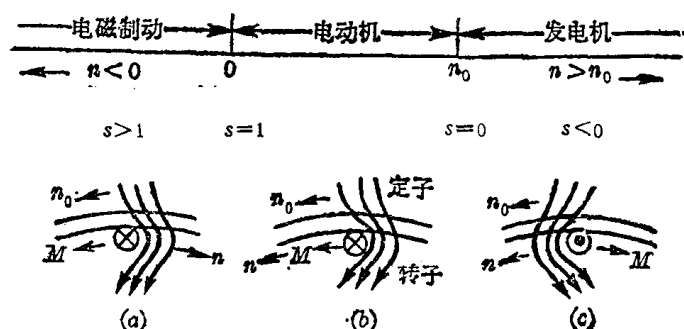


图 1-3 异步电动机的三种运行状态

第二节 异步电动机的等值电路

当转子不转动时,异步电动机定子与转子间的关系如同变压器原副边间的关系一样;在转子绕组开路时,定子电势 E_1 在转子上感应出电势 E_{20} ,其频率与定子频率一样也为 f_1 。而当转子以转速 n 旋转时,定子旋转磁场切割转子绕组的转速为它们的转速差 $n_0 - n$,因此转子感应电势 E_2 及其频率 f_2 都减少到转子不动时的 $s = (n_0 - n)/n_0$ 倍,即

$$E_2 = sE_{20} \quad (1-6)$$

$$f_2 = sf_1 \quad (1-7)$$

若转子不转时，其每相电阻为 r_2 ，每相电抗为 x_{20} 。由于电抗与电流频率成正比，因此当转子转动时，每相电抗 $x_2 = sx_{20}$ 。又设定子每相电阻为 r_1 ，每相电抗 x_1 ，则异步电动机每相定、转子的等效电路如图 1-4 所示。

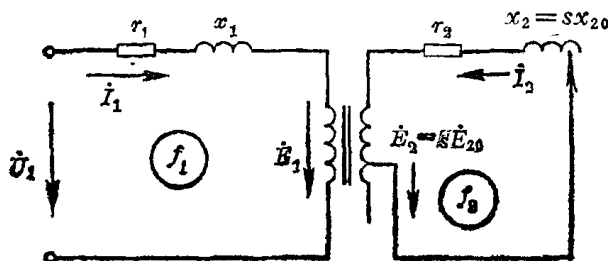


图 1-4 异步电动机转子转动时的定、转子等效电路

由图 1-4 可得转子每相电流

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}} = \frac{sE_{20}}{\sqrt{r_2^2 + (sx_{20})^2}} \\ &= \frac{E_{20}}{\sqrt{(r_2/s)^2 + x_{20}^2}} \end{aligned} \quad (1-8)$$

上式说明如果把转子电阻 r_2 用 r_2/s 代替，就可以用静止的转子电路代替实际的转子电路。电阻由 r_2 变为 r_2/s ，相当于在转子电路中串入了一个附加电阻

$$\frac{r_2}{s} - r_2 = \frac{1-s}{s} r_2 \quad (1-9)$$

这个附加电阻上的功率损耗实际上代表了异步电动机输出的机械功率。当 $0 < s \leq 1$ 时，该附加电阻为正值，表明异步电动机输出机械功率，运行于电动状态；当 $-\infty < s < 0$ 时，该附加电阻为负值，表明异步电动机得到机械功率，运行于发电状态。采用附加电阻

$\frac{1-s}{s}r_2$ 后, 就可以把图 1-4 的等效电路变为图 1-5 所示等效静止变压器电路。

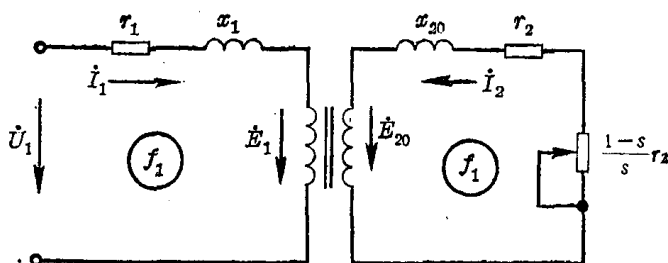


图 1-5 频率归算后异步电动机的定、转子电路
(等值变压器电路)

把图 1-5 所示异步电动机的等值变压器电路中副边各电量归算到原边, 也得到图 1-6 所示等值电路。这里需要附带说明的是, 异步电动机定、转子间的气隙比普通变压器大得多, 因此其空载励磁电流 I_0 就比变压器空载电流大得多, 约为额定值的 20%~50%。由于异步电动机定子绕组的阻抗 $r_1 + jx_1$ 远小于励磁阻抗 $r_m + jx_m$, 故图 1-6 的等值电路可以进一步简化为图 1-7 的近似等值电路。在该二等值电路中, 凡由转子侧折算到定子侧的各电量均在其右上角附加“'”, 以资区别, 且有 $E'_{20} = E_1$ 。

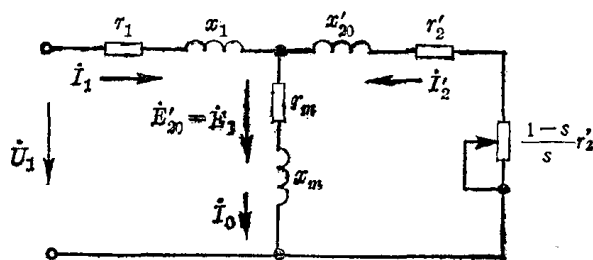


图 1-6 异步电动机的等值电路

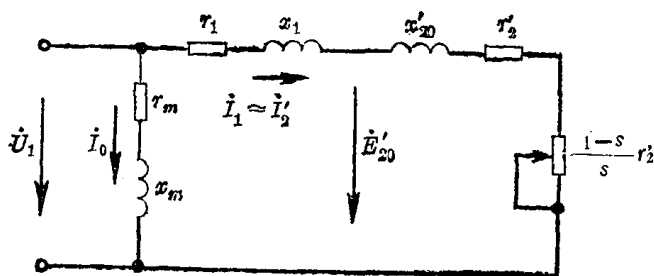


图 1-7 异步电动机的近似等值电路

第三节 异步电动机的机械特性

异步电动机定子从电网取得电功率 P_1 ，经由旋转磁场将功率传递给转子(电磁功率 P_{EM})，并由转子输出机械功率 P_M 。在能量的传输和变换过程中，不可避免地要产生一些损耗。由图 1-5 和 1-6 所示异步电动机等值电路可知，三相异步电动机的输入功率 P_1 为

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (\text{瓦}) \quad (1-10)$$

式中 $\cos \varphi_1$ 为定子功率因数。输入功率中的一小部分 P_{Cu1} 消耗在定子电阻上(定子铜耗)

$$P_{Cu1} = 3I_1^2 r_1 \quad (\text{瓦}) \quad (1-11)$$

另外一小部分 P_{Fe} 消耗在定子铁芯中(定子铁耗)

$$P_{Fe} = 3I_0^2 r_m \quad (\text{瓦}) \quad (1-12)$$

大部分功率 P_{EM} 通过旋转磁场传递给转子(电磁功率)

$$P_{EM} = 3E_1 I_2 \cos \varphi_2' = 3E_{20}' I_2' \cos \varphi_2' \quad (\text{瓦}) \quad (1-13)$$

$$\begin{aligned} \cos \varphi_2' &= \frac{r_2'/s}{\sqrt{(r_2'/s)^2 + x_{20}'^2}} = \frac{r_2/s}{\sqrt{(r_2/s)^2 + x_{20}'^2}} \\ &= \cos \varphi_2 \end{aligned} \quad (1-14)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{EM} &= 3E_{20}I_2 \cos \varphi_2 \quad (\text{瓦}) \\ &= 3I_2^2 r_2 / s \quad (\text{瓦}) \\ &= 3I_2'^2 r_2' / s \quad (\text{瓦}) \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

电磁功率 P_{EM} 中的一小部分消耗在转子电阻上, 称转子铜耗 P_{Cu2}

$$\left. \begin{aligned} P_{Cu2} &= 3I_2^2 r_2 \quad (\text{瓦}) \\ &= 3(I_2')^2 r_2' \quad (\text{瓦}) \\ &= sP_{EM} \quad (\text{瓦}) \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

从电磁功率 P_{EM} 中扣除转子铜耗 P_{Cu2} 后, 便得到总机械功率 P_M ,

$$\left. \begin{aligned} P_M &= P_{EM} - P_{Cu2} \\ &= (1-s)P_{EM} \quad (\text{瓦}) \\ &= 3(I_2')^2 \frac{1-s}{s} r_2' \quad (\text{瓦}) \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

上式反映到等效电路图 1-5 至图 1-7 中, 说明附加电阻 $\frac{1-s}{s}r_2'$ 上的功率消耗代表了异步电动机总的输出机械功率。从总机械功率中扣除机械摩擦损耗 P_{fr} 及其他附加损耗 P_{ad} 后, 就得到转子轴上输出的净机械功率 $P_{2M} = P_M - (P_{fr} + P_{ad})$ 。综上所述可以得到图 1-8 所示功率传输过程。

在式(1-17)中, 如 $s < 0$, 即 $n > n_0$, 将有 $|P_M| > |P_{EM}|$, 而且根据式(1-15), P_{EM} 变为负值, 这意味着电动机将所得到的机械功率转变为电磁功率馈给电网, 即工作于发电状态。

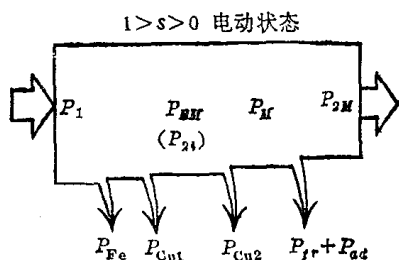
下面我们来求电磁转矩的计算公式。设旋转磁场的角速度为 Ω_0 , 转子转动的角速度为 Ω 。角速度与转速的关系如下:

$$\Omega_0 = \frac{2\pi}{60} n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (\text{弧度/秒}) \quad (1-18)$$

$$\Omega = \frac{2\pi}{60} n \quad (\text{弧度/秒}) \quad (1-19)$$

$$\Omega / \Omega_0 = n / n_0 = 1 - s \quad (1-20)$$

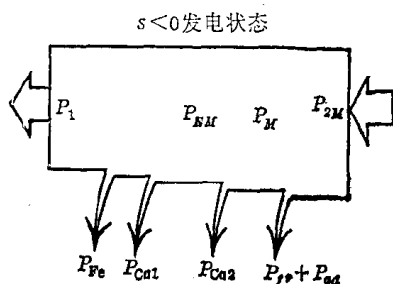
根据力学定律可以由电磁功率求出电磁转矩 M



$$M = \frac{P_{EM}}{\Omega_0} = \frac{P_{EM}}{\Omega/(1-s)}$$

$$= \frac{P_M}{\Omega} \text{ (牛顿·米) } \quad (1-21)$$

上式表明, 电磁转矩既可以用电磁功率 P_{EM} 除以旋转磁场角速度 Ω_0 求得, 也可以用总机械功率 P_M 除以转子转动角速度 Ω 求得。将式 (1-13) 代入式 (1-21) 可得



$$M = \frac{3E_1 I_2'}{\Omega_0} \cdot \cos \varphi_2' \text{ (牛顿·米)}$$

$$= \frac{28.65}{n_0} E_{20} I_2 \cdot \cos \varphi_2 \text{ (牛顿·米)}$$

$$\left. \begin{aligned} & \cdot \cos \varphi_2' \text{ (牛顿·米)} \\ & \cdot \cos \varphi_2 \text{ (牛顿·米)} \end{aligned} \right\} \quad (1-22)$$

图 1-8 异步电动机的功率传输

因为旋转磁场每极的磁通 ϕ_m (韦伯) 与电势 E_1 成正比, 故有

$$\left. \begin{aligned} M &= C_{M1} \phi_m I_2' \cos \varphi_2' \\ &= C_{M2} \phi_m I_2 \cos \varphi_2 \text{ (牛顿·米)} \end{aligned} \right\} \quad (1-23)$$

式中 C_{M1} 和 C_{M2} 为转矩常数,

$$C_{M1} = \frac{3 p w_1 k_{w1}}{\sqrt{2}} \quad (1-24)$$

$$C_{M2} = \frac{3 p w_2 k_{w2}}{\sqrt{2}} \quad (1-25)$$

式中 w_1 和 k_{w1} 分别为定子每相绕组匝数和绕组系数, w_2 和 k_{w2} 分别为转子每相绕组匝数和绕组系数。(1-23) 式说明电磁转矩与磁通及转子绕组内电流的有功分量成正比, 它是符合电磁力定律的。为了便于计算分析, 我们还常常要用到电磁转矩的参数表达

式,即用异步电动机等值电路参数来计算电磁转矩。将式(1-15)代入式(1-21),并根据图 1-7 的等值电路求得电流

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_{20}')^2}}$$

所以

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{3}{\Omega_0} I_2'^2 r_2 / s \\ &= \frac{3U_1^2}{\Omega_0 [(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_{20}')^2]} \cdot \frac{r_2'}{s} \quad (\text{牛顿} \cdot \text{米}) \\ &= 9.56 \frac{3U_1^2}{n_0 [(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_{20}')^2]} \cdot \frac{r_2'}{s} \quad (\text{牛顿} \cdot \text{米}) \\ &= 28.69 \frac{U_1^2}{n_0 [(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_{20}')^2]} \cdot \frac{r_2'}{s} \quad (\text{牛顿} \cdot \text{米}) \end{aligned} \right\} (1-26)$$

根据上式可以画出电磁转矩 M 与转差率 s 的关系曲线 $M=f(s)$, 如图 1-9 所示。由于 $n=n_0(1-s)$, 因此 $M=f(s)$ 也代表异步电动机的机械特性曲线 $M=f(n)$, 仅仅坐标轴的比例尺不同。

由图 1-9 可见,在转差率 $s=s_m$ 时,转矩达到最大值 M_m , 对式 (1-26) 取导数 dM/ds , 然后令 $dM/ds=0$, 即可求得

$$s_m = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_{20}')^2}} \quad (1-27)$$

$$\left. \begin{aligned} M_m &= \pm \frac{1.5U_1^2}{\Omega_0 [\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_{20}')^2} \pm r_1]} \quad (\text{牛顿} \cdot \text{米}) \\ &= \pm \frac{14.35U_1^2}{n_0 [\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_{20}')^2} \pm r_1]} \quad (\text{牛顿} \cdot \text{米}) \end{aligned} \right\} (1-28)$$

式中正号对应于电动机状态,机械特性位于第一象限,负号对应于发电机状态,机械特性位于第二象限, s_m 称为临界转差率。

把 s_m 称为临界转差率的原因如下: 对于第一象限的机械特性而言,异步电动机在机械特性的 $s=0$ 至 $s=s_m$ 区段上运行是稳定

的, 在 $s > s_m$ 区段上运行则是不稳定的, 所以 s_m 是异步电动机运行

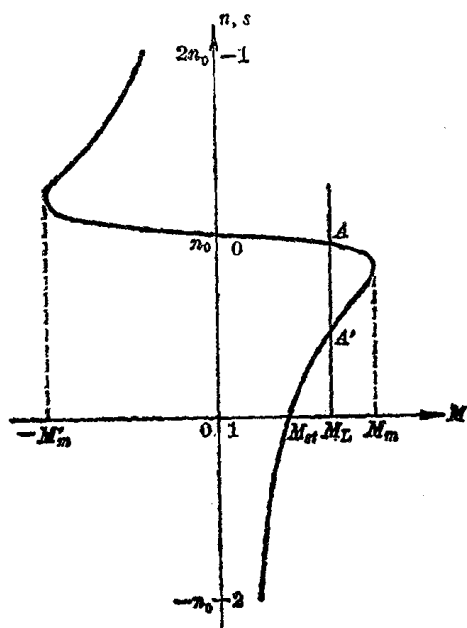


图 1-9 异步电动机的机械特性曲线

稳定与不稳定的分界点。例如有一恒转矩负载, 在图 1-9 中其特性为平行于纵坐标轴的直线, 它与异步电动机机械特性相交于 A 点和 A' 点。若原在 A 点运行, 当偶然原因使转速向上波动时, 电磁转矩就减小, 于是负载转矩大于电磁转矩使电动机减速, 直到转速回到 A 点恢复转矩平衡为止。若由于偶然原因使电动机转速向下波动时, 则电磁转矩增加, 电磁转矩大于负载转矩便使电动机升速, 直到

转速回到 A 点恢复转矩平衡为止。所以说电动机在 A 点能够稳定运行。而对于 A' 点来说, 若转速偶然向上波动, 则电磁转矩大于负载转矩, 电动机将加速, 速度偏离 A' 点越来越大, 直到 A 点转矩重新获得平衡为止; 而当转速偶然向下波动时, 电磁转矩又将小于负载转矩, 电动机将减速直到停止为止。由此可见对于恒转矩负载电动机不可能在 A' 点稳定运行。

由式(1-27)和(1-28)可知, 当电网电压 U_1 变化时, 最大转矩 M_m 随 U_1 的平方成正比变化, 温度变化时引起电阻参数的变化也会使临界点(s_m, M_m)改变, 负载转矩 M_L 也有波动, 因此为保证电动机稳定运行, 通常要求

$$M'_m - M_L > 0.1 M_{rat} \quad (1-29)$$

式中 M_{rat} 为电动机的额定转矩。 M'_m 为允许最低工作电压 (例如 85% 额定电压) 时的最大转矩, $M'_m = M_m d_u^2$, d_u 为允许最低工作电压与额定电源电压之比。

在式(1-26)至式(1-28)中, r_1 通常比 $x_1 + x'_2$ 和 r'_2 小得多, 因此可将上三式化简以便于工程计算:

$$s_m \approx \pm \frac{r'_2}{x_1 + x'_{20}} \quad (1-30)$$

$$M_m \approx \pm \frac{14.35 U_1^2}{n_0 (x_1 + x'_{20})} \quad (\text{牛顿} \cdot \text{米}) \quad (1-31)$$

$$\text{已知: } M \approx \frac{28.69 U_1^2}{n_0 [(r'_2/s)^2 + (x_1 + x'_{20})^2]} \cdot \frac{r'_2}{s} \quad (\text{牛顿} \cdot \text{米})$$

将 M 的表达式除以 M_m 的表达式并化简得

$$M = \frac{2M_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \quad (1-32)$$

电动机的额定转矩:

$$M_{rat} = 9560 \frac{P_{rat}}{n_{rat}} \quad (\text{牛顿} \cdot \text{米}) \quad (1-33)$$

式中 P_{rat} 为电动机额定功率 (千瓦), n_{rat} 为电动机额定转速 (转/分)。

电动机的额定转差率

$$s_{rat} = \frac{n_0 - n_{rat}}{n_0} \quad (1-34)$$

用 $s = s_{rat}$, $M = M_{rat}$ 代入式(1-32)可得:

$$s_m = s_{rat} (k_M + \sqrt{k_M^2 - 1}) \quad (1-35)$$

式中 $k_M = M_m / M_{rat}$ 为最大转矩相对于额定转矩的倍数。

异步电动机在没有任何外加措施情况下的机械特性称为固有机械特性或自然机械特性。根据电机产品目录提供的技术数据,