

第 14 篇 异步电机及交流
换向器电机

主 编 猪 狩 武 尚 (中 央 大 学)
执 笔 者 猪 狩 武 尚 (中 央 大 学)
石 丸 治 (安川電機製作所)
荻 野 昭 三 (東洋電機製造)
河 島 一 光 (東京芝浦電氣)
平 山 勝 己 (明 電 舎)
広 豊 (日 立 製 作 所)
森 田 清 (三 菱 電 機)

译 者 张家元 陈幼祥

目 录

第1章 三相异步电机概述	14-1	5.5 其他的调速方法.....	14-23
1.1 定义和种类.....	14-1	5.6 异步电动机的同步运行(动力同步).....	14-23
1.2 结构.....	14-1	5.7 制动.....	14-24
1.3 旋转磁场、转差率、转矩.....	14-2	第6章 各种异步电机	14-25
1.4 等值电路.....	14-2	6.1 特殊结构的异步电动机.....	14-25
1.5 电抗.....	14-4	6.2 异步发电机.....	14-25
1.6 特性曲线.....	14-4	6.3 电磁耦合器.....	14-26
第2章 三相异步电动机的特性		6.4 其他类型的异步电机.....	14-27
计算法	14-5	第7章 异步电机的瞬变特性	14-28
2.1 三相异步电动机的特性计算法.....	14-5	7.1 异步电机的基本公式.....	14-28
2.2 圆图法.....	14-7	7.2 电源合闸时的瞬变特性.....	14-28
第3章 三相异步电动机的特性	14-9	7.3 剩磁电压和母线切换.....	14-28
3.1 特性和用途.....	14-9	7.4 三相短路.....	14-29
3.2 通用三相异步电动机的特性.....	14-9	第8章 三相异步电机的试验法	14-29
3.3 输出功率和效率、功率因数的关系.....	14-10	8.1 试验项目.....	14-29
3.4 起动等级.....	14-11	8.2 出厂试验.....	14-30
3.5 尺寸和重量.....	14-11	8.3 特殊试验.....	14-30
3.6 用电容器改善功率因数.....	14-11	第9章 单相异步电动机	14-31
3.7 谐波对特性的影响.....	14-13	9.1 单相异步电动机的种类和调速.....	14-31
3.8 有关异步电机的各种标准.....	14-13	9.2 单相异步电动机的理论.....	14-34
第4章 起动	14-14	9.3 特性和标准.....	14-35
4.1 转子型式和起动特性.....	14-14	9.4 两相伺服电动机.....	14-36
4.2 绕线型异步电动机的起动.....	14-15	第10章 交流换向器电机	14-38
4.3 笼型异步电动机的起动.....	14-16	10.1 单相串励电动机.....	14-38
4.4 起动异常现象.....	14-17	10.2 推斥电动机.....	14-39
第5章 调速和制动	14-19	10.3 三相串励电动机.....	14-40
5.1 转子电阻调速.....	14-19	10.4 三相并励电动机.....	14-41
5.2 变极电动机.....	14-19	10.5 换向作用及其改进.....	14-43
5.3 变频调速.....	14-20	参考文献	14-43
5.4 转子励磁调速.....	14-21		

第1章 三相异步电机概述

1.1 定义和种类

1.1.1 异步电机 异步电机具有相互独立的定子和转子绕组,通常,它是借电磁感应作用将能量从一侧绕组传递到另一侧绕组而工作的交流电机。它在正常运行时以异步转速旋转。

连接交流电源侧的绕组称为一次绕组,另一侧绕组称为二次绕组。实用电机的定子通常称为一次。

各种异步电机的设计方案已在十九世纪末完成。

1.1.2 异步电动机 作为电动机工作的异步电机。按转子结构型式可分为以下几类。

(a) 笼型异步电动机 这种异步电动机的转子绕组是由嵌在槽内的多根导条组成,并在铁心两端设有端环将导条短路。有导条嵌在普通深度槽内的普通笼型、用高阻导条的高阻笼型及下述(b)的特殊笼型几种。

(b) 特殊笼型异步电动机 这种异步电动机为了限制起动电流并增大起动转矩,将转子绕组做成特殊结构。根据结构的不同,又可分为双笼型和深槽笼型异步电动机(见1.4.4节)。

(c) 绕线型异步电动机 这种异步电动机的转子绕组是多相绕组,绕组末端通过集电环引出。

1.1.3 异步发电机 作为发电机工作的异步电机(见6.2节)。

1.1.4 其他类型的异步电机 见6.4节。

1.2 结构

1.2.1 结构概述 绕线型异步电动机的结构及各部分的名称如图1所示,笼型异步电动机如图2所示。机座有铸铁、铝合金或钢板等几种材料制成,用来支承定子铁心和克服转子的反作用力。转子由轴承支持,轴承则由端盖支持(大型电机的轴承由轴承架支持)。滚珠轴承被广泛采用,而在大型电机中则多数采用滑动轴承(见第35篇5.3节)。绕线型电动机的集电环用黄铜或不锈钢等制成,带转子绕组短路装置的集电环,则多数具有举刷装置。

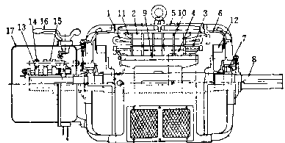


图1 防护式绕线型异步电动机的结构

1—定子绕组 2—定子铁心 3—转子绕组 4—转子铁心 5—机座 6—端盖 7—轴承 8—轴 9—转子支架 10—风道 11—铁心压板 12—风扇 13—集电环 14—刷握 15—刷握杆 16—转子绕组短路和举刷装置操作手柄 17—集电环保护罩

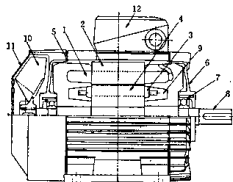


图2 外壳表面自冷式笼型异步电动机的结构

1—定子绕组 2—定子铁心 3—端环 4—转子铁心 5—机座 6—端盖 7—轴承 8—轴 9—内风扇 10—外风扇 11—风扇罩 12—接线盒

此外,外壳部分的结构取决于防护方式及通风、冷却方式(见第15篇6.3节)。

1.2.2 铁心和绕组 铁心以厚0.35mm或0.5mm的硅钢片冲制成带槽的圆形或扇形片后,沿轴向叠压而成。

定子绕组与同步发电机的定子绕组相同,通常采用双层绕法(见第15篇2.1节)。外部端子一般为3个,以星-三角法起动的电机则为6个。

笼型转子和特殊笼型转子,一般以圆形、矩形或楔形截面硬铜或铜合金裸导条嵌入槽内,不加绝缘,在其两端分别焊接一个端环以构成绕组。在小

型通用异步电动机中,广泛采用铸铝转子,把导条和端环铸成一体。

绕线型转子的绕组,仅在小容量电动机中采用圆线双层绕法,一般均采用线棒形绕组,即在各个槽内放置绝缘的两个导体的节距波绕法。图3表示三相四极每相为两个槽的绕线型转子绕组。为了防止转子绕组端部受离心力变形而加有绑扎线。在圆周速度较高的异步电机中,也有采用整体锻造的无磁性钢护环。

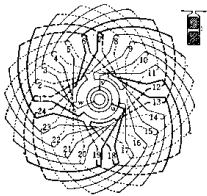


图3 绕线型转子的绕组

1.3 旋转磁场、转差率、转矩

在三相异步电动机的定子绕组中通以三相电流,气隙中就会产生旋转磁场。它的空间基波磁场的旋转方向与电流的相位旋转方向一致时,其旋转速度称为同步转速。电源频率为 f (Hz)、极对数为 p (极数 $P=2p$)的异步电机,其同步转速为:

$$n_s = 60f/p = 120f/P \quad (\text{rpm})$$

当定子绕组中通以三相电流 I_M (A)(有效值),而空间第 ν 次谐波磁通的角位移为 θ 时,磁通密度可用下式求得。

$$B_\nu = \frac{4}{\pi} \frac{3}{2} \mu_0 \frac{k_{w\nu} w_1 \nu \sqrt{2} I_M}{2p\delta_\nu} \frac{1}{\nu} \cos(\omega t \mp \nu p \theta) \quad (\text{T})$$

式中 w_1 : 一相的串联绕组匝数; $k_{w\nu}$: 对应第 ν 次谐波的绕组系数(分布系数和短距系数的乘积); δ_ν : 等效气隙长度(实际气隙长度和卡托系数的乘积)(m); $\omega = 2\pi f$ 。 σ 为正整数而 $\nu = 6\sigma - 5$ 时,取其负号; $\nu = 6\sigma - 1$ 时,则取其正号。

异步电动机通常以略低的同步转速旋转,设转速为 n (rpm),则

$$s = (n_s - n)/n_s$$

式中 s 为转差率,用小数或百分数表示。

等值电路中消耗在 r_1/s 上的功率的三相的分量值,称为转子输入功率。转子输入功率的 $(1-s)$ 作就是机械输出功率。

$$\text{转子输入功率 } P_2 = 3I_1^2 r_2 / s \quad (\text{W})$$

$$\text{输出功率 } P_M = (1-s)P_2 \quad (\text{W})$$

设转子角速度为 ω_m ,则电动机产生的转矩为:

$$T = P_M / \omega_m = P_2 / \omega_s \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

式中 $\omega_s = 2\pi f/p$ 是同步角速度。在异步电机中可用 P_2 值直接表示转矩的大小,即 $T = P_2$ (同步功率),这时的转矩为同步功率转矩。

1.4 等值电路

1.4.1 相量图 普通笼型或绕线型三相异步电动机的一相相量图如图4所示。

主磁通 Φ 产生的感应电势为 $\dot{E}_1$, $\dot{E}_1'$ 为反电势。 $\dot{E}_1'$ 加上定子电阻电压降 $r_1 \dot{I}_1$ 和定子电抗压降 $jx_1 \dot{I}_1$ 而得出的 $\dot{V}_1$,就是电源的星形相电压。励磁电流 $\dot{I}_m$ 由与 $\dot{E}_1'$ 同相的铁耗电流 $\dot{I}_{w\omega}$ 和滞后 $\dot{E}_1'$ 相位的磁化电流 $\dot{I}_{\mu}$ 组成。与转子电流 $\dot{I}_2$ 的磁动势相平衡的定子负载电流 $\dot{I}_1'$,与励磁电流 $\dot{I}_m$ 相量和组成定子电流 $\dot{I}_1$ 。以转差率 s 旋转时的转子感应电势为 $s\dot{E}_2$,它与转子反电势 $(r_2 + jsx_2)\dot{I}_2$ 相平衡。

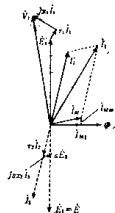


图4 三相异步电动机的相量图

1.4.2 T形等值电路 从图4可知,与 $\dot{I}_1'$ 和 $\dot{E}_1'$ 有关的等值转子阻抗为 $r_2/s + jx_2$ 。因此,普通笼型或绕线型三相异步电动机的一相等值电路可用图5表示,称为异步电动机的T形等值电路。图中, $\dot{Y}_M = g_M - jb_M$ 为励磁导纳, g_M 为励磁电导, b_M 为励磁电纳。

将图5的 $\dot{Y}_M$ 变换成阻抗,就得到图6(a)所示的等值电路。定子电流 $\dot{I}_1$ 可从下式求出。

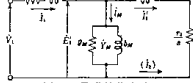


图5 T形等值电路

$$\dot{I}_1 = \frac{(\dot{Z}_M + \dot{Z}_1) \dot{V}_1}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_M + \dot{Z}_M \dot{Z}_2 + \dot{Z}_2 \dot{Z}_1}$$

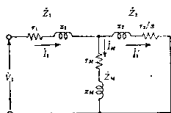
图6(b)的定子电流也可从上式求得。因此,两个电路对定子端是等值的。此外,两个电路间

$$\dot{I}_1 = M \dot{I}_2', \quad \dot{M} = \dot{Z}_M / (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_M)$$

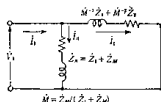
由于存在这种关系, 因此在求出图 (b) 电路中的 I_1 之后, 可以

$$P_1 = 3 I_1^2 r_1 / s = 3 I_1^2 M^{-2} r_1 / s \quad (\text{W})$$

这个等式计算转子输入功率 P_1 , 然后再计算输出功率及转矩。



a) T形等值电路



b) 精确L形等值电路

图6 等值电路的变换

1.4.3 L形等值电路 把图5的励磁导纳移到定子端子侧, 就得到图7的近似等值电路, 称为异步电动机的简化等值电路或L形等值电路。

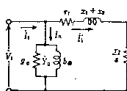


图7 L形等值电路

1.4.4 特殊笼型异步电动机的等值电路 特殊笼型异步电动机分深槽型和双笼型, 两种电动机均利用转子电流频率的转差率产生的变化, 使起动时有效转子电阻增加, 运行时有效转子电阻减小, 这样既不会使运行特性恶化, 又改善了起动特性。现在5.5 kW以上的笼型异步电动机, 全部采用这种特殊笼型。

深槽笼型异步电动机采用图8所示的转子导体。在这种深槽导体中有电流流过时, 越接近槽的底部, 交链的槽漏磁通就越多。因此, 电机起动时由于转子电流频率高和挤流效应的关系, 大部分电

流集中在槽上侧的导体截面上, 从而有效转子导条电阻变大。反之, 电机正常运行时, 转子电流频率低, 电流均匀地分布在导体截面上, 有效转子导条电阻自动变小。

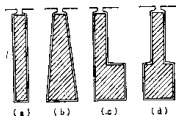


图8 深槽型转子导体

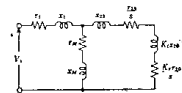


图9 深槽型异步电动机的等值电路

深槽型异步电动机的等值电路如图9所示。笼型绕组的槽外部的电阻和漏抗分别为 r_{2s} 、 x_{2s} , 转差率等于零时, 槽部的电阻和漏抗分别为 r_{20} 、 x_{20} 。 K_r 、 K_i 是转差率的函数, $s=0$ 时 $K_r=K_i=1$, $s>0$ 时 $K_r>1$, $K_i<1$ 。转差率较小时, 可以认为 $K_r \approx K_i \approx 1$ 。这时图9和图6(a)相同。因此, 计算一般运行状态的特性, 其方法与普通笼型异步电机相同。

此外, 在图8(a)矩形截面导体情况下的 K_r 、 $K_i^{(2)}$, 则分别为:

$$K_r = \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi}$$

$$K_i = \frac{3}{2\xi} \frac{\sinh 2\xi - \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi}$$

式中 $\xi = ah$, $a = 2\pi\sqrt{(b/a)(s/\rho) \times 10^{-11}}$

式中 a : 槽宽 (cm); b : 导体宽度 (cm); h : 导体高度 (cm); ρ : 导体电阻率 (Ωm); s : 转差率 (小数)。

双笼型异步电动机的导条如图10所示, 槽上部导条电阻大, 槽下部导条电阻小。它与深槽型一样, 转子导条的有效电阻起动时大, 正常运行时自动变小。双笼型电动机的等值电路如图11所示。 x_{2s} 是槽的上下部分两导体共同交链的漏磁通产生的漏抗。如将图11中 $r_2/s + jx_2$ 和 $r_3/s + jx_3$ 的并联阻抗变换为等值阻抗, 就与图9的电路相同。这

时,由于转差率小时 $K_r \approx K_i \approx 1$, 所以在一般运行状态下的特性可按普通笼型电动机同样计算。

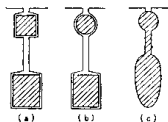


图10 双笼型转子导体

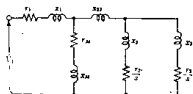


图11 双笼型异步电动机的等值电路

1.4.5 杂散负载损耗 异步电动机的杂散负载损耗随同各种漏磁通而产生,它由与定子电流和转子电流的平方大致成正比的各种漏磁通成分组成。定子槽漏磁通使槽内导体中的电流分布不均而增加电阻损耗;线圈端部的漏磁通使附近金属部件感应涡流而产生损耗;谐波漏磁通会产生谐波引起的铁耗和铜耗;斜槽漏磁通因磁动势不平衡而导致铁耗的增加。

从理论上讲,谐波漏磁通引起的杂散负载损耗,可从空间谐波漏磁通的等值电路⁽⁴⁾角度进行研究,而杂散负载损耗的其他成分,可按等值电路中与 x_1 或 x_2 串联的等值电阻进行考虑。但实际上,这样精确的计算既有困难,又不太需要,因此,在计算效率时,对杂散负载损耗一般简单地采用规定值。

1.5 电 抗

1.5.1 励磁电抗 当铁心的磁导率很大时,可以认为励磁安匝数全部消耗在气隙内部。这时三相异步电动机的励磁电抗 X_{m0} 可从下式求得

$$X_{m0} = \frac{4}{\pi} \frac{3}{2} \omega (k_{w1} w_1)^2 \frac{\mu_0 r l}{p^2 \delta_e} \quad (\Omega)$$

式中 k_{w1} : 对应基波的绕组系数; r : 转子半径; l : 铁心的有效长度。其他符号的含义同 1.3 节。上式中由于存在分母 p^2 , 所以在多极低速电机中,会出现功率因数低的倾向。

一般的异步电动机在施加额定电压后,由于铁

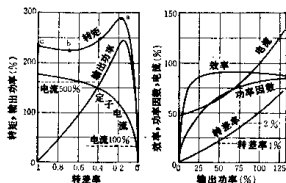
心饱和的缘故,其励磁电抗 X_m 大体上等于下式的数值。

$$\lambda_m = \psi_m / I_m = X_{m0} / (1.1 \sim 1.3)$$

3.5.2 漏抗 异步电机的漏抗包括定子转子槽漏抗,定子转子线圈端部漏抗,气隙磁通分布谐波成分引起的谐波漏抗及斜槽漏抗等(见第15篇 2.4节)。在半闭口槽和开口槽电机中,在额定电流值以下的范围内,一般认为漏抗是一个固定值;在全闭口槽电机中,即使在额定电流值以下,漏抗也不是一个固定值,它随着负载的减少而增大。

1.6 特性曲线

图12(a)是对应转差率的三相异步电动机的特性曲线,其中表示转矩和转差率关系的曲线称为转矩-转速特性曲线,这是一组常用的曲线。转矩-转速特性曲线上通常有一个最大值(a点),该点的转矩叫最大转矩。转子静止时($s=1$)的转矩(c点)是起动转矩(见4.1节)。附加转矩(见4.4节)大的电动机,在a点和c点之间会出现一个转矩的最小值(b点)⁽⁴⁾,该点称为最低起动转矩。一般来说,在a点右侧(转差率小的一侧)电机能稳定地运行,在a点左侧则不稳定。在表示输出功率和转差率关系的曲线上,转差率的某值上会出现一个最大值。此时的输出功率叫最大输出功率。



a) 转速特性曲线 b) 输出功率特性曲线

图12 37kW 四极笼型异步电动机的特性曲线

图12(b)是对应输出功率的特性曲线。随着输出功率的变化,效率、功率因数、定子电流、转差率等也将作相应的变化。这也是一组常用的曲线。从此例可知,异步电动机的功率因数和效率,在轻负载区域内会急剧恶化。

第2章 三相异步电动机的特性计算法

2.1 三相异步电动机的特性计算法

2.1.1 电机参数的计算法 用数值计算异步电机的各种特性,首先必须决定等值电路的参数值。参数值通过对设计数据的计算或测量求得。用测量法决定电机参数时,要通过对定子绕组电阻的测量,从空载试验和堵转试验的结果中去求出参数值。但必须注意,励磁电路的性能、励磁阻抗的饱和及全闭口槽笼型转子电动机中特别明显的漏抗饱和等等,都是产生误差的原因。

(a) L形等值电路(图7)的参数计算法 等值电路及其参数的计算方法很多,图7的L形等值电路,线路简单,其特性计算方便,所以被广泛采用。计算参数可按下述方法进行。

(1) 定子绕组一相的电阻 r_1 (基准绕组温度星形换算值) 设 R_1 为各端子间测得的定子绕组电阻的平均值(Ω), t 为测量电阻时的环境温度($^{\circ}\text{C}$), T 为基准绕组温度= 75°C (A、E、B级绝缘), $=115^{\circ}\text{C}$ (F、H级绝缘),则

$$r_1 = \frac{R_1}{2} \cdot \frac{235 + T}{235 + t} \quad (\Omega)$$

(2) 空载电流电路的参数 g_0 、 b_0 在额定电压的空载试验中,设 V_{11} 为定子额定电压(线电压)(V), I_0 为空载电流(A), W_0 为空载输入功率(W),则

$$g_0 = W_0 / V_{11}^2$$

$$b_0 = \sqrt{(\sqrt{3} I_0 / V_{11})^2 - g_0^2}$$

(3) r_2 和 $x_1 + x_2$

(i) 绕线型和普通笼型异步电机 在额定频率下的堵转试验中,设 V'_1 为定子线电压(V), I'_1 为定子电流(A), W'_1 为输入功率(W),则

$$Z'_1 = V'_1 / (\sqrt{3} I'_1), \quad R'_1 = W'_1 / (3 I_1'^2)$$

$$X'_1 = \sqrt{Z_1'^2 - R_1'^2}$$

$R = R'_1$ (A、E、B级) $= 1.13 R'_1$ (F、H级)

$X = X'_1$

(ii) 特殊笼型异步电机 除额定频率下的堵

转试验外,还要进行1/2额定频率下的低频堵转试验,设此时的电压、电流、输入功率各为 V'_2 (V), I'_2 (A), W'_2 (W),则

$$Z'_2 = V'_2 / (\sqrt{3} I'_2), \quad R'_2 = W'_2 / (3 I_2'^2)$$

$$X'_2 = \sqrt{Z_2'^2 - R_2'^2}$$

用这些数值进行下列计算。

$$h = \frac{2X'_2 - X'_1}{R'_1 - R'_2}, \quad m = \frac{4 + h^2}{3}$$

$$R = 1.6R'_2 - 0.6R'_1 \quad (\text{A、E、B级})$$

$$= 1.13(1.6R'_2 - 0.6R'_1) \quad (\text{F、H级})$$

$$X = 3.2 X'_2 - 0.6 X'_1$$

此外,上式中的 $h > 1$ 时,可按下法求出 R 和 X 。

$$R = R'_1 - m(R'_1 - R'_2) \quad (\text{A、E、B级})$$

$$= 1.13\{R'_1 - m(R'_1 - R'_2)\} \quad (\text{F、H级})$$

$$X = X'_1 + m(2X'_2 - X'_1)$$

(iii) r_2 和 $x_1 + x_2$ 的计算

$$g = R / (R^2 + X^2), \quad b = X / (R^2 + X^2)$$

$$g_1 = g - g_0, \quad b_1 = b - b_0$$

$$r_2 = g_1 / (g_1^2 + b_1^2) - r_1, \quad x_1 + x_2 = b_1 / (g_1^2 + b_1^2)$$

(b) T形等值电路[图6(a)]的参数计算法

上述图6(a)中,假设 $x_1 = x_2$,且

$$r_m = r_n - r_1, \quad x_m = x_n - x_1$$

这是计算参数的简便方法,更准确的参数计算法如下:

(1) 定子绕组电阻同图6(a)。

(2) 以空载试验的结果求出下列数值。

(i) 定子额定电压为 V_{11} (V)时,从电流 I_0 (A)、输入功率 W_0 (W)求出 x_n

$$x_n = \sqrt{\left(\frac{V_{11}}{\sqrt{3} I_0}\right)^2 - \left(\frac{W_0}{3 I_0^2}\right)^2}$$

(ii) 电压 V'_{11} (V)为额定值的60~70%时,从电流 I'_0 (A)、输入功率 W'_0 (W)求出 x'_n

$$x'_n = \sqrt{\left(\frac{V'_{11}}{\sqrt{3} I'_0}\right)^2 - \left(\frac{W'_0}{3 I_0'^2}\right)^2}$$

(iii) 将机械损耗 W_{mL} 和铁耗 W_i 分离,则

$$r_w = W'_1 / (3 I_1^2)$$

(3) 从堵转试验的结果求出下列数值。

(i) 额定频率为 f_n (Hz) 时, 从堵转试验电压 V'_1 (V)、电流 I'_1 (A)、输入功率 W'_1 (W) 求出

$$R_{2L} = W'_1 / (3 I_1'^2) - R_{1L}$$

$$X_L = \sqrt{\left(\frac{V'_1}{\sqrt{3} I_1'} \right)^2 - \left(\frac{W'_1}{3 I_1'^2} \right)^2}$$

$$x_1 = \frac{X_L}{2}, \quad x'_1 = x_n - x_1$$

式中 R_{1L} 为在堵转试验时的温度下, 定子绕组一相的电阻值 (星形换算值)。

利用以上数值进行下列计算, 求出 r'_2 和 x'_2 。

$$X_{2L} = x_1, \quad g'_2 = R_{2L} / (R_{2L}^2 + X_{2L}^2)$$

$$b'_2 = X_{2L} / (R_{2L}^2 + X_{2L}^2)$$

$$g'_w = r_w / (r_w^2 + x_w'^2), \quad b'_w = x'_w / (r_w^2 + x_w'^2)$$

$$g'_2 = g'_2 - g'_w, \quad b'_2 = b'_2 - b'_w$$

$$r'_2 = g'_2 / (g_2'^2 + b_2'^2), \quad x'_2 = b'_2 / (g_2'^2 + b_2'^2)$$

(ii) 以 15 Hz 左右的低频 f_1 (Hz) 做堵转试验, 从试验时的电压 V''_1 、电流 I''_1 及输入功率 W''_1 求出

$$R_{2L}'' = W''_1 / (3 I_1''^2) - R_{1L}$$

$$X_L'' = \sqrt{\left(\frac{V''_1}{\sqrt{3} I_1''} \right)^2 - \left(\frac{W''_1}{3 I_1''^2} \right)^2}$$

设 $f_1/f_n = k$, 进行下列计算, 求出 r'_2 和 x'_2 。

$$X_{2L}'' = X_L'' - k x_1, \quad g_2'' = R_{2L}'' / (R_{2L}''^2 + X_{2L}''^2)$$

$$b_2'' = X_{2L}'' / (R_{2L}''^2 + X_{2L}''^2)$$

$$b_w'' = 1 / (k x_w''), \quad b_2'' = b_2'' - b_w''$$

$$r'_2 = g_2'' / (g_2''^2 + b_2''^2)$$

$$x'_2 = b_2'' / (k (g_2''^2 + b_2''^2))$$

(iii) r_1 和 x_1 的计算

绕线型和普通类型:

$$r_1 = r'_2 \cdot r_1 / R_{1L}, \quad x_1 = x'_2$$

特殊类型:

$$h = (x'_2 - x'_1) / (r'_2 - r'_1)$$

$$h > 1 \text{ 时 } m = (1 + h^2 h^2) / (1 - h^2)$$

$$r_1 = \{r'_2 - m(r'_2 - r'_1)\} \cdot r_1 / R_{1L}$$

$$x_1 = x'_2 + m(x'_2 - x'_1)$$

$$h < 1 \text{ 时}$$

$$r_1 = \{r'_2 - 4/5 \cdot (r'_2 - r'_1) / (1 - h)\} \cdot r_1 / R_{1L}$$

$$x_1 = x'_2 + 4/5 \cdot (x'_2 - x'_1) / (1 - h)$$

(4) 励磁电抗 x_m $x_m = x_n - X'_1/2$

(c) 运行时的参数算法⁽³⁾ 在上述的计算方法中, 如从特殊笼型异步电机的堵转试验结果计算运行时的参数, 且 $h < 1$ 时, 其换算按 JEC-37 (1961) 中采用的方法进行。将换算成电阻和额定频率的电抗, 分别同额定频率和额定频率 1/2 时堵转试验的数值连成直线, 并使之延长, 取该直线上 1/5 频率的点, 这一点可认为大致等于运行时的电阻和电抗。

但是, 对于启动时电阻增加率和漏抗减少率设计得很大的电动机来说, 这种计算方法会产生相当大的误差。在这种情况下, 人们提出了精确度较高的计算方法, 即采用 $h > 1$ 时的计算方法。

理论上已经证明, $h > 1$ 的计算方法, 对双笼型是正确的, 对于深槽笼型, 也近似地正确。研究结果证明, $h > 1$ 的计算方法的理论误差比 $h < 1$ 的计算方法误差要小。

但是, 这种方法已如 h 式中所示, 当 x'_2 和 x'_1 、 r'_2 和 r'_1 在数值上接近时, 即对启动时电阻增加率和漏抗减少率小的电动机, 由于测量上的误差, h 值也可能包含较大的误差。因此, 当 $h > 1$ 时, 采用此法, 而 $h < 1$ 时则采用过去的方法。

2.1.2 特性计算法

(a) 转子各参数折算到定子侧的换算式 将图 5 等值电路中的转子各参数全部折算到定子侧。其换算式如下。

E_{21} : 转子一相静止时的感应电压; I_{21} : 转子一相电流; r_{21} : 转子一相电阻; x_{21} : 转子一相漏抗; m_1 : 转子相数; w_1 : 定子一相圈数; w_2 : 转子一相圈数; k_{w1} : 定子绕组系数; k_{w2} : 转子绕组系数。

如把 E_2 、 I_2 、 r_2 、 x_2 分别折算至定子侧, 则

$$E_1 = \frac{k_{w1} w_1}{k_{w2} w_2} E_{21}, \quad I_2 = -\frac{m_1 k_{w2} w_2}{3 k_{w1} w_1} I_{21}$$

$$r_2 = \frac{3 (k_{w1} w_1)^2}{m_2 (k_{w2} w_2)^2} r_{21}, \quad x_2 = \frac{3 (k_{w1} w_1)^2}{m_2 (k_{w2} w_2)^2} x_{21}$$

设 Z_2 为导条数, p 为极对数, 则笼型转子可以看成是 Z_2/p 相的多相绕组, 且 m_2 、 w_2 、 k_{w2} 可计算如下, 即

$$m_2 = Z_2/p, \quad w_2 = 1/2, \quad k_{w2} = 1.$$

这时, r_{21} 和 x_{21} 可按下式计算。

$$r_{21} = \frac{1}{p} \left\{ r_{2b} + \frac{r_{2e}}{2 \sin^2 (p\pi/Z_2)} \right\}$$

$$x_{22} = \frac{1}{p} \left\{ x_{2b} + \frac{x_{2c}}{2s \sin^2(p\pi/Z_2)} \right\}$$

式中 r_{2b2} 导条电阻; r_{2c2} 两根导条间的部分端环电阻; x_{2b2} 导条的槽漏抗和气隙漏抗; x_{2c2} 两根导条间的部分端环漏抗。

(b) 特性计算式 若将图 6(a) 换算成 (b) 的等值电路进行计算, 就比较易求出任意输出功率、最大输出功率及转矩⁽⁷⁾。在图 6(b) 中, 设 $\dot{Z}_n = r_n + jx_n = r_1 + r_2 + j(x_1 + x_2)$, $\dot{M}^{-1} \dot{Z}_1 + \dot{M}^{-1} \dot{Z}_2 = r_{11} + r_{21}/s + j(x_{11} + x_{21}/s)$, 则该电路参数可用下列各式求得。

$$d_1 = 1 + \frac{r_1 r_m + x_1 x_m}{r_m^2 + x_m^2}, \quad d_2 = \frac{r_1 x_m - r_m x_1}{r_m^2 + x_m^2}$$

$$r_{11} = d_1 r_1 + d_2 x_1 + 2 d_1 d_2 x_2$$

$$x_{11} = -d_2 r_1 + d_1 x_1 + (d_1^2 - d_2^2) x_2$$

$$r_{21} = (d_1^2 - d_2^2) r_2, \quad x_{21} = -2 d_1 d_2 r_2$$

设此时的机械损耗为 W_{M1} , 杂散负载损耗为 W_{L1} , V_1 为星形电压 (V), 则对任意输出功率 P_M (W) 的转差率

$$s = \frac{2c}{b + \sqrt{b^2 - 4ac}}$$

式中 $c = r_2^2 + x_2^2$

$$b = 3V_1^2 \sqrt{r_1^2 + x_1^2} / (P_M + W_{M1} + W_{L1})$$

$$- 2(r_1 r_{21} + x_1 x_{21})$$

$$a = r_1^2 + x_1^2 + 3V_1^2 \sqrt{r_2^2 + x_2^2} / (P_M + W_{M1} + W_{L1})$$

给出最大转矩的转差率 s_t , 给出最大输出功率的转差率 s_p 各为

$$s_t = \frac{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}}{\sqrt{r_1^2 + x_1^2} + \sqrt{r_2^2 + x_2^2}}$$

$$s_p = \frac{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}}{\sqrt{r_1^2 + x_1^2} + \sqrt{(r_{11} + r_{21})^2 + (x_{11} + x_{21})^2}}$$

特性计算可按上述求转差率的方法进行如下:

在图 6(b) 中, 设 $\dot{I}_n = I_{nw} - jI_{nl}$, $\dot{I}_1 = I_{rw} + jI_{rl}$, 则

$$I_{nw} = \frac{r_n}{r_n^2 + x_n^2} V_1, \quad I_{nl} = -\frac{x_n}{r_n^2 + x_n^2} V_1$$

$$r = r_{11} + r_{21}/s, \quad x = x_{11} + x_{21}/s$$

$$I_{rw} = \frac{r}{r^2 + x^2} V_1, \quad I_{rl} = \frac{x}{r^2 + x^2} V_1$$

$$I_t = \sqrt{I_{rw}^2 + I_{rl}^2}$$

定子电流

$$I_t = \sqrt{(I_{nw} + I_{rw})^2 + (I_{nl} + I_{rl})^2} \quad (A)$$

$$\text{输入功率 } P_1 = 3V_1 (I_{nw} + I_{rw}) \quad (W)$$

$$\text{功率因数 } \cos \varphi = (I_{nw} + I_{rw}) / I_t$$

$$\text{效率 } \eta = P_M / P_1$$

$$\text{旋转速度 } n = n_s (1 - s) \quad n_s: \text{同步速度 (rpm)}$$

$s = s_t$ 或 s_p 时的输出功率 (机械损耗和杂散损耗略去不计)

$$P = 3 \frac{1-s}{s} \sqrt{r_2^2 + x_2^2} I_t^2 \quad (W)$$

$$\text{最大转矩 } T_M = P / (0.1047 n) \quad (N \cdot m)$$

(P 、 n 为 $s = s_t$ 时的数值)

式中, 若将漏抗饱和和考虑在内并进行校正计算, 则最大输出功率时的 s_p 和最大转矩时的 s_t 能求得更准确的数值。

另外, 按图 7 简化等值电路计算的转矩和输出功率如下所示。

转矩

$$T = \frac{3pV_1^2 s r_2}{2\pi f \{ (s r_1 + r_2)^2 + s^2 (x_1 + x_2)^2 \}} \quad (N \cdot m)$$

最大转矩

$$T_m = \frac{3pV_1^2}{4\pi f \{ r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2)^2} \}} \quad (N \cdot m)$$

最大转矩时的转差率

$$s_t = r_2 / \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2)^2}$$

起动转矩

$$T_s = \frac{3pV_1^2 r_2}{2\pi f \{ (r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2 \}} \quad (N \cdot m)$$

最大输出功率

$$P_m = \frac{3V_1^2}{2 \{ (r_1 + r_2) + \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2} \}} \quad (W)$$

最大输出功率时的转差率

$$s_p = r_2 / \{ (r_2 + \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}) \}$$

2.2 圆 图 法

2.2.1 圆图的种类 圆图法是利用三相异步电动机的定子电流相量轨迹绘圆图计算特性的一种方法。从图 7 的 L 形等值电路导出的圆图称为 L 形圆图; 从图 5 的 T 形等值电路导出的圆图称为 T 形圆图⁽⁸⁾。L 形圆图由于作图简单被广泛采用。等值电路表明, 励磁电流或定子绕组电压降较大时会产生

假定, 因此希望采用以 T 形圆图或 T 形等值电路为基础的特性计算式。

特殊类型电动机由于流过转子电路的电流频率会引起转子阻抗变化, 因此定子电流的轨迹不能用作绘图, 但在转差率小的范围内可以看成位于一个圆周上, 因此对转差率小的运行特性可以用圆周计算。这时可按 2.1.1 节采用相当于运转时的参数计算方法。此外也可以用圆图计算法代替作圆图来计算特性〔见 JEC-37(1978)〕。

2.2.2 L 形圆图法 作图前先求出下列各值, 然后根据圆图求出各特性值: 额定电压空载运行(线电压 V_{11}) 时电流 I_0 的有功分量 $I_{0w} = W_0 / (\sqrt{3} V_{11})$; 无功分量 $I_{0r} = \sqrt{I_0^2 - I_{0w}^2}$; 阻抗 Z 按 2.1.1 节 (a) 之 (3) 的 R 、 X 决定, 即 $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$; 对应阻抗的堵转电流 $I_s = V_{11} / (\sqrt{3} Z)$; I_s 的有功分量 $I_{sw} = I_s \cdot R / Z$; 无功分量 $I_{sr} = I_s \cdot X / Z$ 以及定子绕组星形换算的一相电阻 r_1 (基准绕组温度时的数值)。

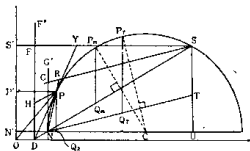


图13 L形圆图

如图 13 所示, 先从原点 O 作垂线, 在垂线上取 $ON' = I_{0w}$, $OS' = I_{sw}$ 。从 N' 和 S' 各引一水平线, 在水平线上取 $N''N = I_{0r}$, $S'S = I_{sr}$ 。从 S 点向 N'N 的延长线作垂线 SU。将 N、S 连成一线, 在其等分点上作垂线, 垂线与 NU 的交点为 C。

以 C 点为中心, CN 为半径绘半圆 (圆弧通过 S 点)。

取 $NS = I_{sr}$ 值, 在 SU 线上取 T 点, 使 $TU = \sqrt{3} I_{sr} r_1 / V_{11}$, 连结 T、N。

将 SN 线向左下方延长, 使其与从原点 O 引出的水平线相交于 D。从 D 点和 N 点各作垂线 DF' 和 NG' 。

DF' 和 $IS'S$ 的交点为 F。

通过 S 作一与 NT 平行的直线, 该平行线与 NG' 的交点为 G。

从圆心 C 向 NS 和 NT 各作垂线, 其延长线同圆周的交点分别为 P_m 和 P_r 。再从 P_m 和 P_r 各作垂线 $P_m Q_m$ 和 $P_r Q_r$ (Q_m 是 NS 上的点, Q_r 是 NT 上的点)。

如欲求出对应输出功率 P_u (W) 的特性, 可按 $I = P_u / \sqrt{3} V_{11}$ 公式计算。在 DF' 线上, 取 $DH = I$ 值, 决定 H 点。从 H 点作一与 NS 的平行线, 平行线同圆周的交点为 P (取第 1 交点)。

从 P 引水平线, 与 OS' 相交于 P'。又将 P 与 O、D、N 连结。DP 的延长线同 FS 的交点为 Y, NP 的延长线同 GS 的交点为 R。又从 P 引垂线, 同 NT 的交点为 Q_2 。

现在可用已作成的圆图求解特性。

(i) 对应输出功率 P 的特性

定子电流 $I_1 = \overline{OP}$ (A)

功率因数 $\cos \varphi = (\overline{OP'} / \overline{OP}) \times 100$ (%)

效率 $\eta = (1 - \overline{FY} / \overline{FS}) \times 100$ (%)

转差率 $s = (\overline{GR} / \overline{GS}) \times 100$ (%)

转矩 $T = \frac{\sqrt{3} V_{11} \overline{PQ_2}}{0.1047 n_s} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$

式中 n_s : 同步转速 (rpm)。

(ii) 最大输出功率

$P_m = \sqrt{3} V_{11} \overline{P_m Q_m}$ (W)

(iii) 停转转矩

$T_m = \frac{\sqrt{3} V_{11} \overline{P_r Q_r}}{0.1047 n_s} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$

第3章 三相异步电动机的特性

3.1 特性和用途

异步电动机按转子结构不同可分为普通笼型、特殊笼型及绕线型。通用异步电动机中的特殊笼型

表1 转子结构及用途

转子结构	用 途
笼型	一般小容量
一类特殊笼型	泵类、鼓风机、空气压缩机、电动机、一般动力
二类特殊笼型	卷扬机、传送带、机床、空气压缩机、压延辅机
特殊笼型 (启动转矩200%以上)	电梯、纺织机械、压延辅机
绕线型 (最大转矩160%以上)	泵类、鼓风机、电动机、空气压缩机、一般动力
绕线型 (最大转矩200%以上)	卷扬机、起重机、电梯、轧机、水泥破碎机、粉碎机、橡胶机、造纸碎木机

又可分为一类特殊笼型和二类特殊笼型。普通笼型用于3.7kW以下的小容量电机上,5.5kW以上的电机用特殊笼型或绕线型。所谓一类特殊笼型,是指启动转矩为满载转矩100%以上的电动机;二类特殊笼型是指启动转矩为满载转矩150%以上的电动机。

通用异步电动机的最大转矩可达160%以上,但卷扬机、起重机及轧机等要求特大的转矩,其最大转矩往往在250~300%以上(表1)。

通用异步电动机已在3.2节和3.3节中阐明,而最大转矩超过250%的电动机或启动转矩超过200%的特殊笼型电动机的特性与通用电动机相比,其效率和功率因数往往低一些。

3.2 通用三相异步电动机的特性

低压三相异步电动机(通用, E级绝缘)的特性,在JIS C 4210(1976)中已有规定。高压(3kV

表2 低压普通笼型(防护式、外壳表面冷却式)

额定输出功率 (kW)	极数	同步转速 (rpm)		满载特性		启动电流 I_{st} (各相的平均值) (A)	参 考 值		
		50Hz	60Hz	效率 η (%)	功率因数 P_f (%)		空载电流 I_0 (各相的平均值) (A)	满载电流 I (各相的平均值) (A)	满载转差率 s (%)
0.2	2	3000	3600	54.5以上	66.0以上	12以下	1.1	1.6	10.0
0.4				62.0以上	72.0以上	19以下	1.5	2.5	8.5
0.75				68.0以上	77.0以上	31以下	2.1	3.9	7.5
1.5				74.5以上	80.5以上	54以下	3.4	6.9	7.0
2.2				77.0以上	81.5以上	75以下	4.6	9.6	6.5
3.7				80.0以上	82.5以上	120以下	6.9	15.4	6.0
0.2	4	1500	1800	56.0以上	63.0以上	12以下	1.5	1.8	10.5
0.4				63.5以上	63.0以上	18以下	2.0	2.8	9.0
0.75				69.5以上	70.0以上	28以下	2.8	4.2	8.0
1.5				75.5以上	75.0以上	48以下	4.3	7.3	7.5
2.2				78.5以上	77.0以上	66以下	5.5	10.0	7.0
3.7				81.0以上	78.0以上	110以下	9.0	16.1	6.5
0.4	6	1000	1200	62.0以上	55.0以上	21以下	2.5	3.2	10.0
0.75				68.0以上	63.0以上	32以下	3.4	4.8	8.5
1.5				74.5以上	69.0以上	53以下	5.2	8.0	8.0
2.2				77.0以上	71.0以上	73以下	6.8	11.1	7.0
3.7				80.0以上	73.0以上	115以下	10.0	17.4	6.5

表3 低压特殊笼型(防护式)

额定输出功率 (kW)	级数	同步转速 (rpm)		满载特性		启动电流 I_{st} (各相的平均值) (A)	参 考 值		
		50Hz	60Hz	效率 η (%)	功率因数 P_f (%)		空载电流 I_0 (各相的平均值) (A)	满载电流 I (各相的平均值) (A)	满载转差率 s (%)
5.5	2	3000	3600	82.0以上	80.0以上	175以下	11	23	6.0
7.5				83.0以上	81.0以上	230以下	14	31	6.0
11				84.0以上	82.5以上	325以下	18	44	5.5
15				85.0以上	83.0以上	440以下	23	58	5.5
5.5	4	1500	1800	82.5以上	78.0以上	155以下	12	24	6.0
7.5				83.5以上	79.0以上	205以下	15	31	6.0
11				84.5以上	80.0以上	295以下	22	45	6.0
15				85.5以上	80.5以上	395以下	28	60	5.5
5.5	6	1000	1200	82.0以上	73.0以上	165以下	15	25	6.0
7.5				83.0以上	74.0以上	220以下	19	34	6.0
11				84.0以上	75.5以上	315以下	25	48	6.0

注: 二级电机仅为特殊笼型的一类。

表4 低压特殊笼型(外壳表面冷却式)

额定输出功率 (kW)	级数	同步转速 (rpm)		满载特性		启动电流 I_{st} (各相的平均值) (A)	参 考 值		
		50Hz	60Hz	效率 η (%)	功率因数 P_f (%)		空载电流 I_0 (各相的平均值) (A)	满载电流 I (各相的平均值) (A)	满载转差率 s (%)
5.5	2	3000	3600	82.0以上	79.5以上	175以下	11	23	6.0
7.5				83.0以上	80.5以上	230以下	14	31	6.0
11				84.0以上	82.0以上	330以下	18	44	5.5
15				85.0以上	82.5以上	440以下	24	59	5.5
5.5	4	1500	1800	82.5以上	77.0以上	165以下	13	24	6.0
7.5				83.5以上	78.0以上	210以下	16	32	6.0
11				84.5以上	79.0以上	310以下	23	45	6.0
15				85.5以上	79.5以上	405以下	29	61	5.5
5.5	6	1000	1200	82.0以上	72.0以上	170以下	15	26	6.0
7.5				83.0以上	73.0以上	225以下	19	34	6.0
11				84.0以上	74.5以上	320以下	26	48	6.0

注: 二级电机仅为特殊笼型的一类。

级)三相异步电动机的特性,属通用、B级绝缘及防护式的,在JEM 1204中有规定;属通用、F级绝缘、防护式及外壳表面冷却式的,在JEM F 3006中有规定。JEM F 3006中还注明噪声级的标准值。

在JIS C 4210和JEM 1204中,对效率、功率因数、启动电流的额定值都有规定;对空载电流、满载电流、满载转差率也注明参考值。

JIS C 4210 标准的部分数据如表2~表4所示。表中的满载电流、空载电流及启动电流,系指额定电压200伏时的数值。若额定电压为 $E(V)$,则取

$200/E$ 。

上述各标准的特性值,均按JIS C 4207(1976)异步电动机的特性算法求得。

另外, A级绝缘低压和高压三相异步电动机的特性,分别在JIS C 4201(1963)、JIS C 4202(1963)中有规定,由于不常用而不再说明。

3.3 输出功率和效率、功率因数的关系

三相异步电动机的输出功率和效率、功率因数的关系如图14和图15所示。

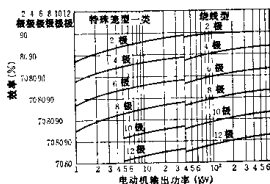


图14 输出功率和效率的关系

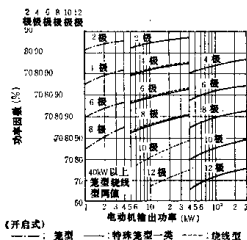


图15 输出功率和功率因数的关系

3.4 起动等级

所谓异步电动机的起动等级,是指异步电动机不用起动装置时,每千瓦输出功率起动时的输入功率等级,每单位输出功率(kW)按输入功率(kVA)划分情况已在表5中用符号示明[JIS C 4204 (1960)]。该表适用于除绕线型以外的低压三相异步电动机和单相异步电动机的起动特性。

3.5 尺寸和重量

低压三相笼型异步电动机(通用、E级绝缘)的尺寸,如表6所示,在JEM 1180中已作规定。

同样,高压(3kV)三相笼型异步电动机的尺寸,属通用、B级绝缘的,在JEM 1203中有规定;属通用、F级绝缘的,在JEM F 3005中有规定。

电动机的标准尺寸,国际电工委员会(IEC)出版物72(1971)中已有注明,今后将考虑按IEC修订日本标准, JEM 1180就是按IEC标准制订的。

表5 起动等级

起动等级	每kW的输入功率(kVA)	起动等级	每kW的输入功率(kVA)
A	—	L	12.1以上
B	4.2以上	M	13.4以上
C	4.8以上	N	15.0以上
D	5.4以上	P	16.8以上
E	6.0以上	R	18.8以上
F	6.7以上	S	21.5以上
G	7.5以上	T	24.1以上
H	8.4以上	U	26.8以上
J	9.5以上	V	30.0以上
K	10.7以上		—

备注: (1) 每kW起动时的输入功率(单相时)

$$= \frac{E_1 I_{st}}{1000 \times \text{额定输出功率(kW)}}$$

每kW起动时的输入功率(三相时)

$$= \frac{\sqrt{3} E_1 I_{st}}{1000 \times \text{额定输出功率(kW)}}$$

式中 E_1 : 额定电压(V); I_{st} : 接近满载电流的堵转电流(A); E_1 : 对应 I_{st} 的阻抗电压(V); I_{st} : 起动电流(A)。

(2) 0.2kW至3.7kW的低压三相异步电动机或单相异步电动机的名牌上记有起动等级。

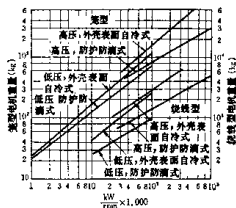


图16 输出功率和重量的关系

3.6 用电容器改善功率因数

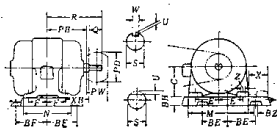
将电容器并联在电动机上,就能改善配电系统的功率因数。此时,只要选定的电容器容量能补偿电动机的励磁电流,不管负载大小均能保持95%以上的功率因数。图17和图18是根据JIS异步电动机标准特性算出的在满载时功率因数各为95%的低、高压电动机所需的电容器容量。

异步电动机和电容器并联后脱离电源,由于自

○ 原书误为37kW。——译者注

表6 低压三相笼型异步电动机(通用E级)的尺寸

在环境温度40℃以下使用时, E级绝缘, 连续定额, 频率为50Hz或60Hz的外壳表面冷却式低压三相笼型异步电动机的底板、皮带轮尺寸及机座号均适用下表规定。



(单位: mm)

额定输出功率 (kW)			机座号	电动机												底 板										皮带轮尺寸 (mm)	
				C	E	F	M	N	XB	R	PB	安装孔距			Z	S	公差	Q	W	U	BE	BF	BH	BZ	X	PD 直径	PW 宽度
2 极	4 极	6 极																									
0.2	0.2	—	63	60	50	40	135	111	40	103	80	7.2	11	h 6	23	—	1	50	80	30	12	40	50	38			
0.4	0.4	—	71	71	56	45	150	125	45	120	90	7.2	14	h 6	30	5	3	55	85	30	12	40	75	65			
0.75	0.75	0.4	80	80	62.5	50	170	135	50	140	100	9.5	19	h 6	40	5	3	65	90	30	12	40	75	65			
1.5	1.5	0.75	90 L	90	70	62.5	185	160	56	168.5	118.5	9.5	24	h 6	50	7	4	70	105	30	12	40	100	75			
2.2	2.2	1.5	100 L	100	80	70	225	180	63	183	133	11	24	h 6	50	7	4	80	115	40	12	50	125	75			
3.7	3.7	2.2	112 M	112	95	70	245	180	70	200	140	11	28	h 6	60	7	4	95	115	40	12	50	140	100			
5.5	5.5	3.7	132 S	132	108	70	275	190	89	239	159	11	32	h 6	80	10	4.5	110	120	45	12	60	140	125			
7.5	7.5	5.5	132 M	132	108	89	275	230	89	258	178	11	32	h 6	80	10	4.5	110	140	45	12	60	180	125			
11	11	7.5	160 M	160	127	105	325	270	108	323	208	15	42	h 6	110	12	4.5	125	165	50	16	70	180	150			
15	15	11	160 L	160	127	127	325	310	108	345	230	15	42	h 6	110	12	4.5	125	185	50	16	70	230	150			

备注: (1) C尺寸的公差, 按JIS B 9902(1976)(旋转轴高度)规定取-0.1 mm。

(2) S尺寸的公差, 按JIS B 0401(1976)(配合方式)规定取h 6。

(3) M和N表示最大值, X表示最小值。

(4) 本表使用的尺寸符号, 按JEM 1016(扁盘型卧式旋转电机的尺寸符号)规定。

(5) 引出线无特殊定时, 从非终结侧看设置在右方。

(6) 本标准适用于外壳表面冷却式, 对防护式也推荐引用。

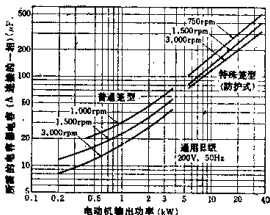


图17 低压电动机所需的电容器容量

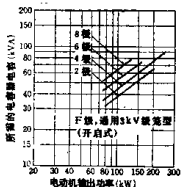


图18 高压电动机所需的电容器容量

身的旋转和剩磁的作用成为异步发电机而感应电压。这时电容器取得比励磁电流小的超前电流, 自励电压不会超过额定电压。为了减少起动时的容量(kVA), 要注意某些地方设置的电容器为空载容量(kVA)的2~3倍, 或者为了改善多台电动机的功率因数将多只电容器集中设置在一个地方。采取的措施是将电容器比电动机先从电源断开, 或用过电压继电器断开电容器。

除了改善负载时的功率因数外, 改善笼型异步电动机起动时的功率因数, 也能减小起动时的容量(kVA)。起动电流450%的电动机并上电容器后, 可以使起动电流减少到300~350%。星-三角起动时, 起动电流150%的电动机并上电容器, 可将起动容量减少到70~100%。

3.7 谐波对特性的影响

异步电动机在含有谐波的电源电压(非正弦波电压)下运行, 因受谐波成分的影响, 其特性和在正弦波电压下运行相比较, 其损耗和转矩特性均不相同(见第17篇8.7.4节)。

对应第 ν 次谐波电压 $V_{1\nu}$ 的等值电路如图19所示。

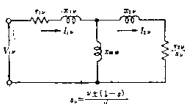


图19 等值电路
式中, ν 号表示与基波成分同向旋转
-号表示与基波成分反向旋转

图19 等值电路

第 ν 次谐波电压 $V_{1\nu}$ 产生的定子铜耗($W_{1\nu}$)和转子铜耗($W_{2\nu}$)用下式表示。

$$W_{1\nu} = m I_{1\nu}^2 r_{1\nu}, \quad W_{2\nu} = m I_{2\nu}^2 r_{2\nu} \quad (m: \text{相数})$$

第 ν 次谐波的电动机阻抗, 可看成近似地等于堵转阻抗, 由于频率高, 堵转阻抗也可看成近似地等于堵转电抗, 即

$$Z_{2\nu} \approx X_{2\nu} = \nu x_2 = \nu Z_s \sin \varphi_s$$

$$\begin{aligned} \text{故} \quad I_{1\nu} &= \frac{V_{1\nu}}{\nu Z_s \sin \varphi_s} = \frac{(V_{1\nu}/V_1)V_1}{\nu Z_s \sin \varphi_s} \\ &= \frac{V_{1\nu}/V_1}{\nu \sin \varphi_s} I_s \end{aligned}$$

式中 I_s 为施加正弦波电压时的起动电流。因此, $W_{1\nu}$ 和基波电压产生的定子铜耗 ($W_1 = m I_s^2 r_1$) 之比为

$$\frac{W_{1\nu}}{W_1} = \frac{(V_{1\nu}/V_1)^2}{\nu^2 (1 - \cos^2 \varphi_s)} \left(\frac{I_s}{I_1} \right)^2 \left(\frac{r_{1\nu}}{r_1} \right)$$

当施加含有谐波电压时产生的铁耗, 可认为同单独施加单个谐波电压成分时的铁耗的总和相等。

另外, 对单个电压成分来说, 若认为铁耗与磁通平方和频率平方大致成正比, 则第 ν 次谐波电压引起的铁耗 $W_{1\nu}$ 和基波电压产生的铁耗 W_1 之比为

$$W_{1\nu}/W_1 = (V_{1\nu}/V_1)^2$$

设 p 为极对数, 则第 ν 次谐波电压 $V_{1\nu}$ 产生的轴转矩可用下式表示

$$T_{\nu} = \frac{p}{\nu \omega} m I_{2\nu}^2 \frac{r_{2\nu}}{s_{\nu}} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

因为基波电压产生的轴转矩 T , 可用 $T = (p/\omega) m I_s^2 r_1/s$ (N·m) 表示, 故 T 和 T_{ν} 之比为

$$\begin{aligned} \frac{T_{\nu}}{T} &= \frac{1}{\nu} \left(\frac{I_{2\nu}}{I_2} \right)^2 \frac{r_{2\nu}}{r_2} \frac{s}{s_{\nu}} \\ &= \frac{(V_{1\nu}/V_1)^2}{\nu^2 (1 - \cos^2 \varphi_s)} \left(\frac{I_s}{I_1} \right)^2 \frac{r_{2\nu}}{r_2} \frac{s}{s_{\nu}} \end{aligned}$$

例如, 设 $V_{1\nu}/V_1 = 0.05$, $\cos \varphi_s = 0.25$, $I_s/I_1 = 5$, $r_{1\nu}/r_1 = 1$, $r_{2\nu}/r_2 = 1$, $I_{1\nu} \approx I_1$, $s = 0.05$, 则第 ν 次谐波电压和基波电压产生的各种损耗及转矩如下。

$$\text{定子铜耗} \quad \frac{W_{1\nu}}{W_1} = \frac{0.067}{\nu^2}, \quad \text{铁耗} \quad \frac{W_{1\nu}}{W_1} = 0.25\%$$

$$\text{转子铜耗} \quad \frac{W_{2\nu}}{W_2} = \frac{0.067}{\nu^2}, \quad \text{转矩} \quad \frac{T_{\nu}}{T} = \frac{0.0033}{\nu^2 \times s_{\nu}}$$

3.8 有关异步电机的各种标准

日本工业标准

JIS C 4004(1962) 旋转电机通用标准

JIS C 4203(1975) 单相异步电动机(通用)

JIS C 4204(1960) 异步电动机的起动等级

JIS C 4207(1976) 三相异步电动机的特性计算方法

JIS C 4210(1967) 低压三相笼型异步电动机(通用、E级绝缘)

JIS C 4211(1967) 低压三相笼型异步电动机(通用、E级绝缘)的尺寸

JIS C 0901(1975)煤矿用机电器的防爆结构	缘)的尺寸
JIS C 0902(1985)煤井用机电器的防爆结构的试验方法	JEM 1204(1967) 高压(3kV)三相笼型异步电动机(通用、B级绝缘)的特性
JIS C 0903(1975) 通用机电器的防爆结构通用标准	JEM 1224(1968) 高压三相笼型异步电动机负载 GD^2 的容许值
JIS C 0904(1973) 通用机电器的防爆结构试验方法	JEM 1249(1971) 单相异步电动机(通用)的尺寸
JIS C 0905(1975) 动力机电器的防爆结构电气学会电气标准调查会标准	JEM 1277(1970) 船用三相异步电动机的标准规格书
JEC-37(1978) 异步电机	JEM 1285(1970) 船用标准三相笼型异步电动机(E级绝缘)的规格书
JEC-146(1976) 旋转电机通用标准	JEM 1312(1963) 旋转电机的轴承温升限度
H本电机工业会标准	JEM F 3005(1975) F级绝缘通用3kV级三相笼型异步电动机的尺寸
JEM 1020(1965) 三相异步电动机(通用)的试验方法	JEM F 3006(1975) F级绝缘通用3kV级三相笼型异步电动机的特性和噪声级
JEM 1180(1967) 低压三相笼型异步电动机(通用、E级绝缘)的尺寸	劳动部工业安全研究所
JEM 1189(1970) L50凸缘式低压三相笼型异步电动机(E级绝缘)的尺寸	工厂电气设备防爆指南(爆炸性气体、蒸气防爆)(1974)
JEM 1201(1967) 防爆增安型低压三相笼型异步电动机的尺寸	工厂电气设备防爆指南(粉尘防爆)(1976)
JEM 1202(1967) 起重机用全封闭外扇冷却绕组型低压三相异步电动机	
JEM 1203(1967) 高压(3kV)三相笼型异步电动机(通用、B级绝	

第4章 起 动

4.1 转子型式和起动特性

4.1.1 起动电流和起动转矩 将静止状态电动机增速到运行转速,称为起动。起动电流、起动转矩从广义上讲是指起动过程中的输入电流和电动机转矩(通常是指起动过程电气暂态现象消失后的数值),但往往也指静止时的起动电流(采用起动装置时从电源取得的电流)和静止时的起动转矩。若由于转子位置引起某种变化时,静止时的起动电流最大值,称为最大起动电流;静止时的起动转矩最小值,称为最小起动转矩。另外,加速过程中的起动转矩和负载转矩之差称为加速转矩。

4.1.2 绕线型异步电动机的起动特性 绕线型三相异步电动机以转差率 s 旋转时,如忽略励磁电流,其定子电流 I_1 和转矩 T 为

$$I_1 = \frac{V_1}{\sqrt{(r_1 + r_2/s)^2 + (x_1 + x_2)^2}} \quad (\text{A})$$

$$T = \frac{3pV_1^2 r_2/s}{2\pi f \{(r_1 + r_2/s)^2 + (x_1 + x_2)^2\}} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

从上式可知, I_1 和 T 都是 r_2/s 的函数,因此 r_2 和 s 若同时增加任何相同的倍数, I_1 和 T 均不改变,即对一定的定子电流和转矩来说,电动机的转差率与转子电阻按比例变化。这个现象称为比例偏移。图20表示转矩的比例偏移, A表示仅有转

子绕组电阻时的特性曲线, B、C、D表示外部接有电阻, 使转子电阻增加到3倍、5倍、10倍时的转矩速度特性曲线。因此, 绕线型电动机可通过选择接在转子电路内的电阻器电阻值, 以与负载相适应的转矩起动。这叫做转子电阻起动。起动电流依靠定子电流的比例偏移保持很小的数值。

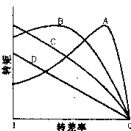


图20 比例偏移

4.1.3 笼型电动机的起动特性 图21对不同型式笼型电动机的起动特性作了比较。普通笼型电动机的起动电流大, 而起动转矩又小, 由于这些缺点, 其容量仅限于3.7 kW以下。深槽笼型电动机主要具有限制起动电流的特性, 双笼型电动机主要具有加大起动转矩的特性。高阻笼型电动机由于低速运行时的转矩很大, 因而常用于重惯性负载的重复起动以及速度变动率大并装有飞轮的峰值负载的场合。

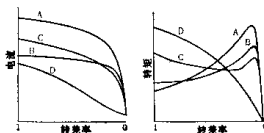


图21 转子型式和起动特性

A: 普通笼型 B: 深槽笼型 C: 双笼型
D: 高阻笼型

通常, 若电动机和负载的合成飞轮效应为 GD^2 (kgm^2), 同步转速为 N_s (rpm), 则起动时的转子铜耗为 $GD^2 N_s^2 / 730$ (J)。因此负载惯性大, 起动时的转子铜耗也大, 尽管发生的时间很短, 但笼型绕组会达到相当高的温度, 由此而反复产生的热膨胀会引起机械性损伤。特别是双笼型, 起动时转子铜耗的大部分集中在绕组上部, 绕组上部有必要采用电阻率大的黄铜材料, 并加大截面积和热容量。对上述问题, 采用深槽笼型较双笼型有利。

4.1.4 起动特性的计算

起动时, 采用起动装置限制起动电流的起动特性, 按一般试验所得的等效电路常数进行计算, 不至产生大的误差。但是, 若从低压堵转试验的结果

计算全压起动电流和起动转矩时, 如不考虑漏抗饱和, 往往会产生很大的误差。

观察各种异步电动机堵转时的电流电压曲线, 可以看到, 一般小电流范围内 (额定电流以下), 全闭槽电机槽上部封闭部分的磁饱和会引起曲线弯曲; 中等电流范围内 (约额定电流的100~200%), 齿端楔形部分的饱和会引起曲线弯曲; 大电流范围内铁心齿深方向的饱和会引起曲线弯曲, 而且弯曲度各不相同。因此, 从低压堵转试验的结果求全压起动电流的计算式, 要与异步电动机不断发展变化的结构和设计内容相适应, 按符合实测值的经验式进行校正。以最近关于异步电动机的实测值为基础导出的起动电流计算式如下^[10]。

设堵转电流约等于额定电流的100%、150%、200%, 并分别用 I_1' 、 I_2' 、 I_3' 表示。各对应的堵转试验电压分别用 V_1' 、 V_2' 、 V_3' 表示。设 V_n 为额定电压, 则全闭槽电机全压起动电流为

$$I_{st} = V_1' (V_n / V_1')^{\beta}$$

$$\beta = 0.7 \alpha + 0.35$$

$$\alpha = \log(I_3' / I_1') / \log(V_3' / V_1')$$

半闭槽电机和开口槽电机的全压起动电流为

$$I_{st} = 1.04 I_1' (V_n / V_1')^{\gamma}$$

$$\gamma = 1.05 \gamma_1 - 0.35 (\gamma_1 - 1) \quad (\gamma_1 > \gamma_1 \text{ 时})$$

$$= 0.7 \gamma_1 + 0.35 \quad (\gamma_1 \leq \gamma_1 \text{ 时})$$

$$\gamma_1 = \log(I_2' / I_1') / \log(V_2' / V_1')$$

$$\gamma_2 = \log(I_3' / I_1') / \log(V_3' / V_1')$$

用上式求得的 I_{st} 代入下式求出起动转矩

$$\tau_s = p (W_1' - 3 I_1'^2 r_1) (I_{st} / I_1')^2 / \omega$$

$$(\text{N} \cdot \text{m})$$

式中 p : 极对数; W_1' I_1' 时的堵转输入功率 (W); $\omega = 2\pi f$ 。

4.2 绕线型异步电动机的起动

绕线型异步电动机通过集电环在转子侧接入电阻器, 既能得到大的起动转矩, 同时也限制了起动电流。起动后逐渐减少接在转子侧的电阻, 最后将其全部短路。起动电阻器可分为液体电阻器和金属电阻器。液体电阻器是利用改变在碳酸钠溶液等液体中平行放置的电极间距离, 来改变电阻值。电极通过力矩电动机及其传动机构移动, 其方式一般可分为规定时间内移动的限时起动式和以电流继电器控制的电流值在一定限度内发出电极移动指令的限