

166916

Tm32
4409

电动机应用计算指南

蔡方耀 编著

中国计划出版社

1998 北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

电动机应用计算指南/蔡方耀编著. —北京: 中国计划出版社, 1998.2

ISBN 7-80058-585-9

I. 电… II. 蔡… III. 电动机—工程计算—计算方法 IV. TM32-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 22909 号

电动机应用计算指南

蔡方耀 编著

☆

中国计划出版社出版

(地址: 北京市西城区月坛北小街 2 号 3 号楼)

(邮政编码: 100837 电话: 68030048)

新华书店北京发行所发行

北京华星计算机公司排版

世界知识印刷厂印刷

787×1092 毫米 1/16 26 印张 641 千字

1998 年 2 月第一版 1998 年 2 月第一次印刷

印数 1—4000 册

☆

ISBN 7-80058-585-9/TM·1

定价: 40.00 元

前 言

随着生产过程的自动化,绝大部分工作机械都需要电动机来拖动运行,电动机应用的广泛性涉及到工农业生产与生活的各个领域。

三相异步电动机具有重量轻、结构简单、运行可靠、成本低廉、安装维护方便等优点,故其所用之广,随处可见。因此,全面介绍这类电动机的工程应用计算方法就成为本书的主要内容。

第1章用较短的篇幅介绍异步电机主要参数与特性。

第2章圆图,论述了圆图的历史成就,原理及其表征异步电机运行状况等特点。关于T型等值电路的六阻抗参数精确圆图(双圆圆图),书中作了全面叙述。微型或小型异步电机用五阻抗参数较精确圆图来计算这类电机将引起很大误差,它无法获得令人满意的结果,而只能借助于精确圆图,此点通过第2和第9章算例可以证实。在科技飞速发展的今天,这类电机应用范围在不断扩大。四参数简化圆图只能近似地用于大、中型电机。书中对双鼠笼与深槽两种电机的圆图特征也作了说明。

第3章介绍大、中型异步电动机的机械特性、阻抗参数,绕线转子电动机启动电阻,运行特性等计算方法。它是以简化圆图为基础进行分析的,其误差仍然在工程使用的允许范围之内。虽然在计算中作了一些不影响物理本质的简化,但其结果却简单明了、概念清晰,便于计算。

第4与第5章分别是电动机启动与制动的有关计算。

第6章详细论述了可控硅串级调速原理、矢量图以及六种可能的运行方式,目前我国只用到低同步串级电动方式一种,德国与日本在70年代就已制造出超同步串级装置的系列产品。由于整流换向的技术困难,直流调速单机功率受到严重限制,在大型电机调速方案中,以交流代替直流已成趋势,串级调速就是最佳选择之一。本书对串级机械特性计算、电流圆图与轨迹等都作了详细介绍。

第7章讨论变频调速时机械特性的精确算法,指出了电压与频率保持比例调节关系时所产生的误差,还提供了保持最大转矩 M_K 不变调节时电压应高出频率相对值补偿关系计算式,然后介绍了忽略定子电阻 r_1 时近似计算方法。

第8章只初步地探讨不对称电压运行的计算方法。它是建立在经典的对称分量法基础之上的,由于编著者是从应用的观点出发,所以该章只分析三相异步电动机的单相运行和鼠笼电动机定子单相串接电阻或电抗启动计算。

第9章讨论圆图应用于电机试验的计算依据。对于日本国家标准JEC—37《感应电机试验方法》内所采用的圆图计算公式作了详细说明,因为该方法已被我国国家标准GB 1032—85《三相异步电动机试验方法》所采用。

本章对在空载与短路试验数据的基础上如何计算T型等值电路六个阻抗参数作了详细的分析,除迭代法外推荐了三种实用计算方法,计算过程的繁简程度各不相同。共介绍了系数法、近似法、精确法、迭代法等四种计算方法。本章9~13节算例证实四种方法计算结果

误差不大，阻抗参数确定后可以按常规程序计算电动机工作特性。此外，还提供了定子与转子漏抗、励磁回路电抗的精确算法。

第 10、11 章为直流电动机拖动特性计算与电动机功率选择。

第 12 章为同步电动机计算与 U 形曲线。

本书是编著者长期从事电气应用设计工作经验积累和点滴研究体会的总结，虽然竭智尽力以保证质量，但由于水平有限，谬误之处，在所难免。希望能起到抛砖引玉作用，敬请读者批评指正。

本书出版曾得到高级工程师强十渤先生的大力支持与帮助，特此表示衷心感谢。

目 录

1 异步电机参数计算	(1)
1.1 等值电路与参数	(1)
1.2 理想空载电流	(7)
1.3 关于 C_1 值计算	(9)
1.4 异步电机在不同运行方式时的能量图	(10)
1.5 机械特性	(14)
1.6 异步电机阻抗参数相对值	(16)
1.7 计算例题	(17)
2 圆图	(20)
2.1 概要	(20)
2.2 圆图的数学表达式	(21)
2.3 定子电流圆	(23)
2.4 励磁电流圆	(24)
2.5 精确圆图	(25)
2.6 转子电流圆	(30)
2.7 损耗分析	(32)
2.8 较精确圆图	(37)
2.9 简化圆图	(40)
2.10 精确圆图的旋转情况	(42)
2.11 计算例题	(43)
2.12 双鼠笼电动机圆图	(49)
2.13 深槽电动机圆图	(54)
2.14 磁通与电流简化圆图	(58)
2.15 双鼠笼电动机计算例题	(61)
2.16 深槽电动机计算例题	(66)
2.17 关于电流圆半径公式的计算	(69)
3 运行特性	(73)
3.1 简化圆图参数计算	(73)
3.2 转矩方程式	(76)
3.3 转子电流、转差率与负载转矩关系	(77)
3.4 机械特性曲线相对值算法	(80)
3.5 转子电流的相对值关系	(84)
3.6 阻抗计算	(85)
3.7 启动电阻计算	(87)
3.8 定子电流、功率因数与负载转矩关系	(90)
3.9 运行特性计算	(92)
3.10 空载电流	(95)

3.11	电压变化时运行	(96)
3.12	特殊鼠笼电动机特性计算	(98)
3.13	功率因数、转子电流与转差率关系	(100)
3.14	计算例题——按样本数据计算异步电机参数	(102)
4	启动方式	(120)
4.1	平均转矩方程式	(120)
4.2	单轴转矩启动	(123)
4.3	加速过程计算	(127)
4.4	三相转子接入不对称电阻计算	(128)
4.5	鼠笼型电动机启动计算	(131)
4.6	电动机启动时电压波动计算	(136)
4.7	绕线转子串接频敏变阻器启动	(140)
4.8	计算例题	(140)
5	异步电动机的制动与工作方式	(149)
5.1	直流制动基本原理	(149)
5.2	等效电流计算	(150)
5.3	矢量图与机械特性	(151)
5.4	相对机械特性曲线	(155)
5.5	异步电动机同步化时过载能力	(157)
5.6	发电制动	(158)
5.7	反接制动	(160)
5.8	异步电动机的工作方式	(164)
5.9	计算例题	(165)
6	串级调速	(170)
6.1	原理	(170)
6.2	工作机械与异步电动机功率关系	(173)
6.3	整流器串级运行方式	(177)
6.4	恒转矩串级时最大转矩的理论值	(184)
6.5	机械特性	(186)
6.6	串级圆图	(193)
6.7	计算例题	(205)
7	变频拖动机械特性	(212)
7.1	异步电动机定子与转子频率关系	(212)
7.2	圆图	(213)
7.3	转矩	(216)
7.4	最大转矩与临界转差率变化规律	(217)
7.5	比例调节	(219)
7.6	保持最大转矩不变时电压与频率关系	(221)
7.7	计算例题	(224)
7.8	定子电阻 $r_1 = 0$ 时近似计算	(228)
7.9	变频特性、功率与损耗计算例题	(233)
7.10	关于频率为 60 与 50Hz 的电动机互换问题分析	(235)

7.11	电压和频率变化时近似计算	(236)
7.12	频率 60Hz 的电动机用于 50Hz 电源算例	(238)
8	不对称运行	(240)
8.1	一般计算	(240)
8.2	单相运行	(242)
8.3	单相运行时电压圆图	(247)
8.4	单相电阻启动	(250)
8.5	单相电抗启动	(253)
8.6	计算例题	(254)
9	圆图与电机试验	(260)
9.1	空载试验	(260)
9.2	短路特性	(263)
9.3	电流圆的变化	(266)
9.4	定子电阻与转差率	(268)
9.5	阻抗计算与 C_1 值确定	(270)
9.6	L 型电路圆图计算	(274)
9.7	T 型电路精确圆图计算	(279)
9.8	T 型等值电路工作特性计算	(282)
9.9	短路电流 I_K 计算例题	(291)
9.10	相角计算例题	(293)
9.11	T 型电路精确圆图计算例题	(294)
9.12	等值电路特性计算例题	(297)
9.13	等值电路阻抗参数计算例题	(299)
9.14	小型异步电动机电流计算例题	(301)
10	直流拖动计算	(304)
10.1	他励直流电动机机械特性	(304)
10.2	计算例题	(310)
10.3	他励直流电动机的启动	(312)
10.4	启动电阻计算例题	(317)
10.5	过渡历程计算	(320)
10.6	过渡历程计算例题	(322)
10.7	他励直流电动机的制动	(326)
10.8	制动计算例题	(334)
10.9	串励直流电动机机械特性与启动电阻计算	(339)
10.10	串励电动机计算例题	(345)
11	电动机功率选择	(349)
11.1	概要	(349)
11.2	电机的发热与冷却	(349)
11.3	电机工作方式分类	(353)
11.4	长期工作制电动机功率选择	(355)
11.5	短时工作制功率选择	(361)
11.6	重复短时工作制功率选择	(364)

11.7 短时工作制功率选择算例	(366)
11.8 矿井提升机电动机选择计算例题	(367)
12 同步电动机计算	(371)
12.1 运行原理	(371)
12.2 同步电动机基本参数	(372)
12.3 算例	(375)
12.4 运行特性	(376)
12.5 算例	(376)
12.6 U形曲线	(378)
12.7 U形曲线计算例题	(381)
12.8 相对值与参数计算汇总	(384)
12.9 改善功率因数计算	(387)
12.10 凸极同步电动机计算	(389)
12.11 凸极同步电动机计算例题	(392)
附录 A 主要物理量单位符号索引	(396)
附录 B 电气符号索引	(396)
参考文献	(403)

1 异步电机参数计算

1.1 等值电路与参数

异步电机具有重量较轻、结构简单、运行可靠、设计制造的成本低廉、安装维护方便、与电网联接不需任何变换装置等一系列的优点。工业生产的工作机械中，约有 90% 以上设备是用异步电动机拖动。

三相异步电动机在定子接于供电电源之后产生旋转磁场，它经过定、转子之间气隙在转子绕组中产生感应电流，它们相互作用而建立电磁转矩，因此异步电动机也称为感应电动机。

异步电机与变压器相比较有共同点，首先它们都有一次与二次绕组，其相互间都是利用电磁感应关系相联系的，因此异步电机与变压器有相同的理论基础。其次，虽然异步电机是旋转机械，但是也可以将其旋转的参数折算到静止的定子侧，结果转子与定子旋转磁场是相对静止的，故异步电机具有与变压器相类似的等值电路与矢量图。

将异步电机转子参数折算到定子侧之后，可以得出每相 T 型等值电路（图 1-1）。

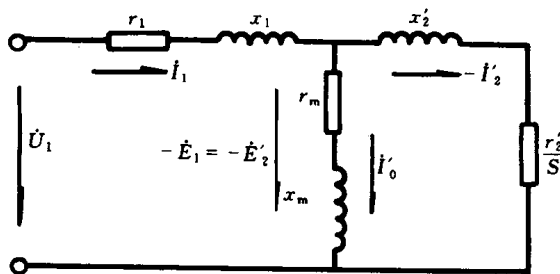


图 1-1 异步电机 T 型等值电路

据此写出电流方程式：

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U_1}{Z_1 + \frac{Z_m Z'_{2S}}{Z_m + Z'_{2S}}} \\ -I'_2 &= \frac{-\dot{E}_1}{Z'_{2S}} \\ I'_0 &= \frac{-\dot{E}_1}{Z_m} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

电势方程式：

$$-\dot{E}_1 = \frac{U_1}{1 + \frac{Z_1}{Z_m} + \frac{Z_1}{Z'_{2S}}} \quad (1-2)$$

将 (1-1) 式分母略经变换可以得出电流关系：

$$\left. \begin{aligned} -\dot{E}_1 &= \dot{I}_1 \frac{Z_m Z'_{2S}}{Z_m + Z'_{2S}} \\ -\dot{I}'_2 &= \dot{I}_1 \frac{Z_m}{Z_m + Z'_{2S}} \\ \dot{I}'_0 &= \dot{I}_1 \frac{Z'_{2S}}{Z_m + Z'_{2S}} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

电势变换关系可以用变比来表示:

$$K_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{E'_2}{E_2} \quad (1-4)$$

经折算后转子等值阻抗将随着转差率 S 变化而变化,

$$Z'_{2S} = r'_2 + r'_2 \frac{1-S}{S} + jx'_2 \quad (1-5)$$

在转子不动 $S=1$ 时

$$Z'_2 = r'_2 + jx'_2 \quad (1-5a)$$

以上参数都是以每相为基础, 其中:

- $\dot{U}_1$ ——定子电压;
- $\dot{E}_1$ ——定子电势;
- $\dot{E}_2$ ——转子电势;
- $\dot{E}'_2$ ——折算至定子侧转子电势;
- $\dot{I}_1$ ——定子电流;
- $\dot{I}'_2$ ——折算至定子侧转子电流;
- $\dot{I}'_0$ ——励磁电流;
- r_1 ——定子电阻;
- x_1 ——定子漏电抗;
- r'_2 ——折算至定子侧转子电阻;
- x'_2 ——折算至定子侧转子漏电抗;
- r_m ——励磁回路电阻;
- x_m ——励磁回路电抗。

变压器等值电路理论方法虽然可以用于异步电机, 但二者之间仍然存在下述本质上的差别:

- (1) 变压器的电磁关系中的磁场是脉振磁场, 而异步电机是旋转磁场。
- (2) 变压器的一次和二次绕组都固定在同一磁路的铁芯上, 它们不能相对移动。而异步电机的定子与转子电磁关系是通过气隙耦合的, 定子与转子绕组轴线可以相对移动, 因而可以改变感应电势的相位差。
- (3) 变压器只是把一种电压的电能转换成另一种电压的电能的电气机械。而异步电机是一种机械能与电能均可以相互转换, 或将电参数进行变换的多功能机械。
- (4) 变压器由于其一次与二次绕组在同一铁芯上, 没有空气隙, 故其空载电流只占额定电流的 3%~8%, 而异步电机有较大的空气隙, 所以空载电流占额定电流的 20%~50%。

(5) 异步电机的运行参数与其转差率 S 有密切关系，而变压器不存在此关系。

(6) 异步电机的阻抗远大于变压器的阻抗，所以空载时其压降约为额定电压的 $2\% \sim 5\%$ ，而变压器只 $0.1\% \sim 0.5\%$ 。又因其漏抗较大故比变压器有较小的短路电流。

三相异步电机是因为定子旋转磁场切割转子绕组而产生感应电流，它们相互作用而使转子旋转的，因此旋转磁场的转速 n_1 与转子机械转速 n 之间就必然存在转速差。否则，若 $n = n_1$ 则二者是相对静止的，即旋转磁场不切割转子绕组，也就不能产生感应电流。

按前面的等值电路可以看出：运行中的异步电机就像一台在二次绕组内串联了 $\frac{1-S}{S}r'_2$ 纯电阻的变压器，此时异步电机转子磁势基波 F_2 对于定子的转速为 $(n_1 - n) + n = n_1$ ，由于定子磁势基波 F_1 对于转子的转速为 n_1 ，故可以看出在任何转差率 S 情况下， F_1 与 F_2 总是相对静止的。

转差率是异步电机一个重要参数：

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (1-6)$$

式中 n_1 为定子供电频率 f_1 时旋转磁场转速，即同步转速 $r/\min$ ；

n 为转子转速， $r/\min$ 。

同步转速 n_1 与频率 f_1 成正比，又与定子极对数 P 成反比。

对于 $f_1 = 50$ 或 60Hz 不同 $2P$ 值时的 n_1 值如表 1-1 所示。

同步转速 n_1 值表 ($r/\min$)

表 1-1

$2P$		2	4	6	8	10	12	16	20	24
f_1	50	3000	1500	1000	750	600	500	375	300	250
	60	3600	1800	1200	900	720	600	450	360	300

定子阻抗

$$Z_1 = r_1 + jx_1 \quad (1-7)$$

励磁回路阻抗

$$Z_m = r_m + jx_m = z_m \angle \phi_m \quad (1-8)$$

当定、转子相数相等时，转子阻抗的折算关系为：

$$\left. \begin{aligned} r'_2 &= K_e^2 r_2 \\ p'_2 &= K_e^2 x_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

而转子电流折算关系：

$$I_2 = K_e I'_2 \quad (1-10)$$

式中 r_2 、 x_2 、 I_2 为转子每相电阻、漏电抗、电流。

转子旋转后与静止状态有着原则上区别，此时转子磁势对于定子绕组的旋转速度 $n + Sn_1 = n_1$ 。若以 f_1 和 f_2 分别表示在电动状态下运行的异步电机定子和转子转差频率时，则可以用图 1-2 表示其相互关系。

当电机在转差率 S 情况下旋转时，折算至定子侧转子电势为： $E'_{2S} = SE'_2$ ，其频率 $f_2 = Sf_1$ ，在不同频率下的电流运算是没有意义的。

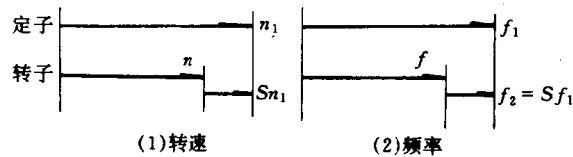


图 1-2 异步电动机定子与转子转速或频率关系

电机旋转后频率为 f_2 时的转子电流：

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + (Sx_2)^2}} = \frac{SE_2}{\sqrt{r_2^2 + (2\pi L_2 f_2)^2}} \quad (1-11)$$

为了对等值电路进行计算，必须将频率进行折算，折算成与定子相同的频率，即折算至转子不动 $S=1$ 时情况，此时转子电流为：

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(\frac{r_2}{S})^2 + x_2^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{(\frac{r_2}{S})^2 + (2\pi L_2 f_1)^2}} \quad (1-12)$$

式中 L_2 为转子每相电感。

上面两个式子电流数值虽然一样；但其本质的区别在于频率已进行了折算，将转子转差频率 f_2 折算至 f_1 ，这样就可以按等值电路来计算，同时转子电流的大小与相位并不因为折算关系而有所变化。

从 (1-11) 和 (1-12) 两个不同频率的转子电流表达式还可以看出：电机旋转后与静止时具有相等的转子电流与磁通 ϕ_m 。

以上参数之间关系可用矢量图（图 1-3）表示，图中 ω_1 和 ω_2 为转子旋转时 F_1 和 F_2 的角速度。

图 1-3 (1) 是按 (1-11) 式画出的，该图的频率是 $f_2 = Sf_1$ ，相应的角速度 ω_2 为：

$$\omega_2 = \frac{2\pi n_1}{60} S = \frac{2\pi f_1}{P} S \quad (\text{rad/s}) \quad (1-11a)$$

在 ω_2 角速度下旋转，其中 P 电机的极对数。转子电流 I_{2s} 具有随转差率 S 变化而变化的频率 f_2 ，它与 E_{2s} 之间的相位差角为 ϕ_{2s} 。这个矢量图完全符合异步电动机转子运行的物理状态。

为了将转子并入定子而完整地研究异步电动机运行时的矢量关系，必须将转子向定子侧进行折算，包括：

(1) 频率折算。进行频率折算后的等值转子回路矢量图如图 1-3 (2) 所示，其中转子电流 I_2 ，电势 E_2 ，相角 ϕ_2 均已折算到转子不动 ($S=1$) 时的频率，故其旋转磁势的角速度为：

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2\pi f_1}{P} \quad (\text{rad/s}) \quad (1-12a)$$

它是按 (1-12) 式关系来建立的。这个矢量图虽然不完全符合转子实际运行的物理状态，但对问题的分析带来了方便。

(2) 电势折算。为了将转子电路与定子电路合并，除频率折算外，还要按 (1-4) 式即

$E'_2 = E_1$ 关系将转子电势折算到定子侧。这样就得出图 1-3 (3) 所示整个异步电动机完整的矢量图。

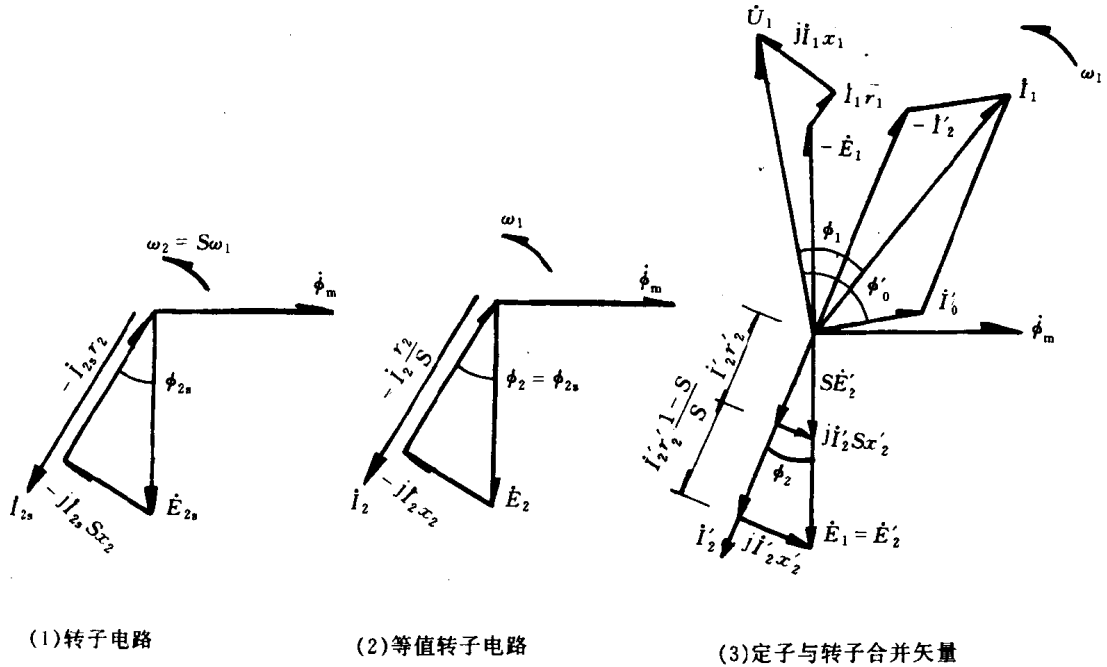


图 1-3 异步电动机矢量图

由以上分析可以明确，异步电动机的矢量图是按图 1-1 的 T 型等值电路画出的，转子电路已经经过频率与电势两个参数的折算。

主磁通 Φ_m 所感应的电势 $E_1 = E'_2$ 等于励磁回路电势，它滞后于 Φ_m 的电角度为 90° ，励磁电流 I'_0 超前于 Φ_m ，这个超前角度的大小取决于 $(90^\circ - \phi_m)$ 角， E_1 随 S 变化而变化。

由于异步电动机属感性负载，故折算后转子电流 I'_2 滞后于 E'_2 ，其相位差角为：

$$\phi_2 = \phi_{2S} = \arctan \frac{Sx'_2}{r'_2} \quad (1-12b)$$

也就是说 ϕ_2 随着 S 变化而变化。在额定负载运行状态下，由于额定转速 n 接近 n_1 ，故 $S_e = 0.01 \sim 0.05$ ，大值适合于大型而小值为小型电动机额定转差率，因此可以近似认为 I'_2 与 E'_2 同相位。

用 (1-1) 式关系可以得出定子电流矢量，依定子电势平衡关系 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$ 可以画出 $\dot{U}_1$ 矢量。显然对于电动机来说 $\dot{I}_1$ 滞后于 $\dot{U}_1$ 的相角为 ϕ_1 。又由于理想空载时电能主要消耗于励磁回路与定子的无功损耗，故 $\dot{U}_1$ 超前于理想空载电流 $\dot{I}''_0$ 的相角 ϕ''_0 接近 90° 。

比值 $\frac{r'_2}{S} = r'_2 + \frac{1-S}{S} r'_2$ 两边乘以 $(I'_2)^2$ 即为转子功率，其中第一项 $(I'_2)^2 r'_2$ 为转子的铜损耗，第二项 $(I'_2)^2 \frac{1-S}{S} r'_2$ 为转子的电功率即等于机械功率。对于电动机而言，因 $0 < S < 1$ ，上面第二项是正值即电能转变成机械能，若是发电机 $-\infty < S < 0$ 第二项为负值，即将机械能转变成电能。

由以上所述可知：矢量图包括三个基本关系。

(1) 定子回路频率 f_1 的时间矢量与定子参数空间相位矢量关系。

(2) 转子回路频率 f_2 的时间矢量与转子参数空间相位矢量关系。而且它又随着转差率 S 的变化而变化。

(3) 通过转子频率与电势两个参数的折算而合并的异步电动机矢量图即图 1-3 (3)，表示了定子参数空间相位与转子参数空间相位关系。

所以异步电机不仅是一种能量形式变换的机械，而且是可以将电参数本身如频率、电势、电流、相数等进行变换的多功能机械。

电机的短路状态是在转子不动 $S = 1$ 条件下确立的，按等值电路若将转子短路得出图 1-4 (1) 所示，当定子相电压为 $\dot{U}_1$ 时其短路电流为：

$$\dot{I}_K = \frac{\dot{U}_1}{Z_K} = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + \frac{Z'_2}{\dot{C}_2}} \quad (1-13)$$

定子短路阻抗 Z_K 为：

$$Z_K = r_K + jx_K = (r_1 + \frac{r'_2}{\dot{C}_2}) + j(x_1 + \frac{x'_2}{\dot{C}_2}) \quad (1-14)$$

其中转子校正系数 $\dot{C}_2$ 为：

$$\dot{C}_2 = 1 + \frac{Z'_2}{Z_m} = C_2 e^{-j\psi_2} = C_{21} - jC_{22} \quad (1-15)$$

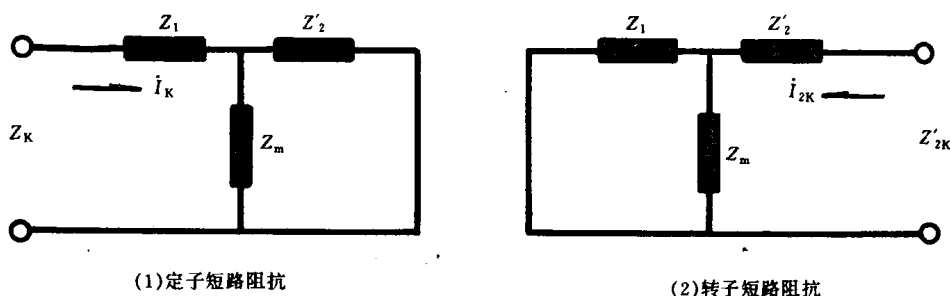


图 1-4 异步电机短路阻抗

若将定子短路而转子不动，并从转子侧馈电其相电压为 $\dot{U}_2$ 则此时如图 1-4 (2) 所示，转子短路电流为：

$$\dot{I}_{2K} = \frac{\dot{U}_2}{Z'_{2K}} = \frac{\dot{U}_2}{Z'_2 + \frac{Z_1}{\dot{C}_1}} \quad (1-16)$$

其短路阻抗 Z'_{2K} 为：

$$Z'_{2K} = r'_{2K} + jx'_{2K} = (\frac{r_1}{\dot{C}_1} + r'_2) + j(\frac{x_1}{\dot{C}_1} + x'_2) \quad (1-17)$$

定子校正系数 $\dot{C}_1$ 为：

$$\dot{C}_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_m} = C_1 e^{-j\psi_1} = C_{11} - jC_{12} \quad (1-18)$$

将上式代入 (1-2) 式并利用 (1-1) 式电势关系得出折算至定子侧的转子电流为：

$$-\dot{I}'_2 = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + \dot{C}_1 Z'_{2S}} \quad (1-19)$$

可见在定子相电压 $\dot{U}_1$ 不变情况下, $-I'_2$ 将随 S 的变化而变化。同时 $\dot{U}_1$ 与 $-I'_2$ 之间相位差角 ϕ'_2 也变化。而定子电流

$$I_1 = I'_0 + (-I'_2) \quad (1-20)$$

同样也随 S 变化而变化。

1.2 理想空载电流

下面分析理想空载的特点。在 $S=0$ 即转子为同步转速的理想情况下, 图 1-1 的 T 型等值电路中转子回路已经断开, 此时 $-I'_2=0$, 而定子电流 $I_{1(s=0)} = I''_0$ 称为理想空载电流, 如图 1-5 (1) 所示。

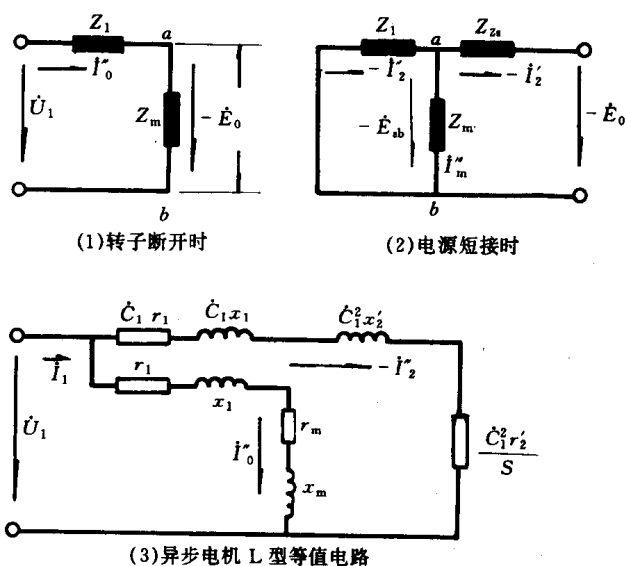


图 1-5 异步电机等值电路变换

$$I''_0 = I'_0 \angle -\phi''_0 = i_1 - j i_2 = \frac{\dot{U}_1}{Z_0} = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_m} \quad (1-21)$$

式中阻抗

$$Z_0 = Z_1 + Z_m = r_0 + j x_0 = (r_1 + r_m) + j (x_1 + x_m) = z_0 \angle \phi''_0 \quad (1-22)$$

此时励磁阻抗 Z_m 上电势:

$$-E_0 = \frac{\dot{U}_1 Z_m}{Z_1 + Z_m} = I''_0 Z_m \quad (1-23)$$

是 $-E_1$, 在 $S=0$ 时的值, 即理想空载定子相电势。

按戴维宁 (Thevenin) 定理: $-E_0$ 是开路电压, 而 Z_1 与 Z_m 并联总电阻为等值电阻, 将定子电源 $\dot{U}_1$ 短接, 用 $-E_0$ 加于转子侧如图 1-5 (2) 所示, 故有

$$-I'_2 = \frac{-E_0}{Z'_{2s} + \frac{Z_1 Z_m}{Z_1 + Z_m}} \quad (1-24)$$

或在 (1-19) 式右边分子、分母各除以 C_1 也得上式。

而在图 1-5 (2) 中 ab 两端电势 $-E_{ab}$ 可以按并联电路求出:

$$-E_{ab} = (-I'_2) \frac{Z_1 Z_m}{Z_1 + Z_m} \quad (1-25)$$

再从该图可以求出通过定子阻抗的电流 $-I''_2$ ，并参考 (1-19) 式后为：

$$-I''_2 = \frac{-E_{ab}}{Z_1} = \frac{-I'_2 Z_m}{Z_1 + Z_m} = \frac{U_1}{\dot{C}_1 Z_1 + \dot{C}_1^2 Z'_{2s}} = \frac{-I'_2}{\dot{C}_1} \quad (1-26)$$

利用迭加原理，将图 1-5 (1) 和 (2) 中通过阻抗 Z_1 的电流相加即得出定子电流：

$$I_1 = I''_0 + (-I''_2) \quad (1-27)$$

这样可以画出图 1-5 (3) 的 L 型等值电路。可见 T 型电路将激磁回路移前至电源端后转子电流变成 $-I''_2$ ，同时在 Z_m 回路串进 Z_1 后再接于 U_1 ，其电流 I''_0 是恒定矢量。

而在 T 型等值电路中，励磁电流 I'_0 是随 S 按圆的规律变化的量， I''_0 只不过是电流 I'_0 圆上的一个特殊点即 $S=0$ 点。

图 1-5 (2) 中励磁回路电流：

$$I''_m = \frac{-E_{ab}}{Z_m} = \frac{-I'_{2s} Z_1}{Z_1 + Z_m} = (-I'_2) - (-I''_2) = I''_0 - I'_0 \quad (1-27a)$$

它在第二章图 2-2 精确圆图中 I_1 与 I'_0 圆关系内用 $I''_m = \overline{CH}$ 线段表示。

此外，若利用 (1-1) 式的 I_1 减去 (1-21) 式，略经变换后也可以得出 (1-26) 式结果。

由于图 1-5 (3) 中 $-I''_2$ 回路内 $\dot{C}_1$ 是复数故给分析计算增加一些麻烦。

I'_0 轨迹是一个圆，这是由于负载变化时转子阻抗和转差率 S 是变化的，其计算将在下章讨论。

$$\frac{I'_0}{I''_0} = \frac{\dot{C}_1 Z'_{2s}}{Z_1 + \dot{C}_1 Z'_{2s}} \quad (1-28)$$

其数量比

$$\frac{I'_0}{I''_0} = \sqrt{\frac{(\frac{C_1 r'_2}{S})^2 + (C_1 x'_2)^2}{(r_1 + \frac{C_1 r'_2}{S})^2 + (x_1 + C_1 x'_2)^2}} = \frac{C_1 E_1}{U_1} \quad (1-29)$$

在一般情况下，可以近似认为 $r_1 = C_1 r'_2$ 和 $x_1 = C_1 x'_2$ ，又可以得出 I'_0 或 E_1 相对值随 S 变化的规律 (图 1-6)。

显然，在 $S=0$ 时， $I'_0 = I''_0$ ，而且 E_1 也接近 U_1 。相反，在转子不动， $S=1$ 时，励磁电流 I'_0 仅为 I''_0 的一半左右；在电动状态下， $E_1 < U_1$ 和 $I'_0 < I''_0$ ，所以只有在 $S=0$ 唯一条件下具有等式

$$I_{1(s=0)} = I'_{0(s=0)} = I''_0 \quad (1-30)$$

其中 I_1 与 I'_0 还取决于电势平衡关系：

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= I_1 Z_1 + I'_0 Z_m \\ 0 &= I'_0 Z_m - (-I'_2 Z'_{2s}) \end{aligned} \right\} \quad (1-31)$$

实际上空载时还存在机械损耗 P_{fw} 和空载时杂散损耗 P_{s0} ，这些损耗可以看成是电机轴上的一个附加阻力矩，电动机必须克服它而旋转，所以转差率 S 不可能为零。真正空载电流 I_0 将比理想空载电流 I''_0 稍大，电动运行时：

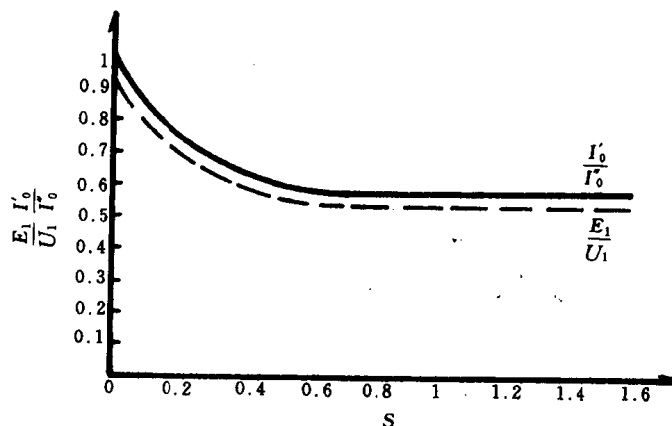


图 1-6 I'_0 或 E_1 与精差率 S 关系

$$I_0 > I''_0 \geq I'_0 \quad (1-32)$$

因为 I_0 的有功分量稍大于 I''_0 的有功分量，迫使电动机以一个很小很小的 S 值而旋转。此时尽管外部负载转矩为零，又因 $P_{fw} + P_{s0}$ 很小，只占额定功率 P_e 的 1%~3%，而 I_0 与 I''_0 都有较大并大致相等的无功分量，故 I_0 与 I''_0 值很接近。

1.3 关于 C_1 值计算

校正系数 C_1 的物理意义在于它是异步电机 T 型与 L 型两种等值电路转子电流的比值，也是定子相电压 U_1 与理想空载时电势 $-E_0$ 的比值；或阻抗 Z_0 与 Z_m 的比值，即：

$$C_1 = \frac{-I'_2}{-I''_2} = \frac{U_1}{-E_0} = \frac{Z_0}{Z_m} = C_{11} - jC_{12} = C_1 e^{-j\psi_1} \quad (1-33)$$

理想空载下的矢量图与正常负载运行有着原则性区别，如图 1-7 所示， U_1 滞后于 $-E_0$ 。

按 (1-8) 和 (1-18) 式不难得出上式实部：

$$C_{11} = \frac{1}{Z_m} [r_m(r_1 + r_m) + x_m(x_1 + x_m)] \quad (1-34)$$

虚部：

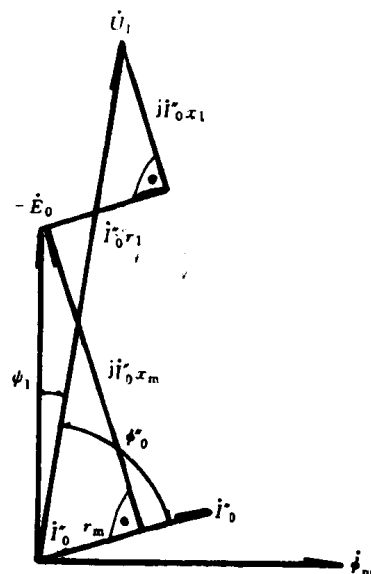
$$C_{12} = \frac{1}{Z_m} (r_1 x_m - x_1 r_m) \quad (1-35)$$

幅值：

$$\begin{aligned} C_1 &= \sqrt{C_{11}^2 + C_{12}^2} \\ &= \frac{Z_0}{Z_m} = \sqrt{\frac{(r_1 + r_m)^2 + (x_1 + x_m)^2}{r_m^2 + x_m^2}} \end{aligned} \quad (1-36)$$

在一般异步电机中有比值不等式

$$\frac{r_1}{x_1} > \frac{r_m}{x_m} \quad (1-37)$$



(1-37) 图 1-7 异步电机理想空载时矢量图