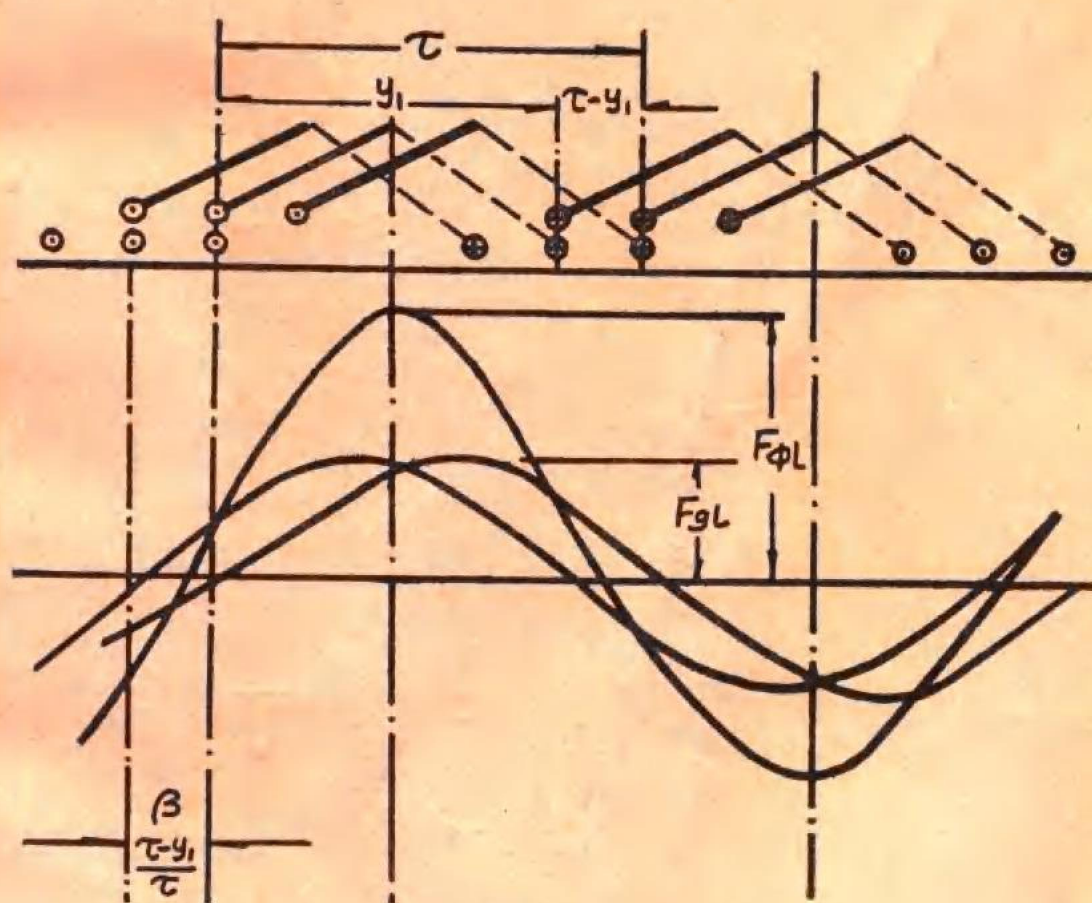


高等专科学校试用教材

电机学

(下册)

邬基烈 主编



上海交通大学出版社

内 容 简 介

全书共四篇,分上、下两册。内容包括绪论、变压器、同步电机、异步电机和直流电机。每章后附有习题,书末附有参考答案。

本书可作高等专科学校、职工大学电力类专业教材,也可供大容量机组电气专业技术人员培训班以及中等专业学校及技工学校有关专业师生参考使用。

电 机 学

(下册)

出 版:上海交通大学出版社

(淮海中路1984弄19号)

排 版:浙江上虞汤浦印刷厂

发 行:新华书店上海发行所

印 刷:江苏省常熟市印刷二厂

开 本:787×1092(毫米)1/16

印 张:9.25

字 数:222000

版 次:1989年2月第1版

印 次:1989年4月第1次

印 数:1—15000

科 目:184—237

ISBN7-313-00335-8/TM·3

定 价:3.05 元

目 录

第三篇 异步电机

第十六章 异步电机的基本结构和运行状态	2
16-1 异步电机的基本结构.....	2
16-2 异步电机的工作原理及三种运行状态.....	4
16-3 异步电动机的额定值.....	6
结语.....	7
习题.....	7
第十七章 异步电机的运行原理	8
17-1 转子电流为零时的异步电机.....	8
17-2 转子静止时的异步电机.....	11
17-3 转子旋转时的异步电机.....	14
17-4 异步发电机运行.....	16
17-5 等效电路的变换与化简.....	18
结语.....	20
习题.....	21
第十八章 异步电机的功率与力矩	23
18-1 异步电机的功率与力矩平衡.....	23
18-2 异步电机的电磁力矩.....	28
18-3 异步电机的谐波附加力矩.....	36
结语.....	41
习题.....	42
第十九章 异步电机的起动与调速	44
19-1 原理综述.....	44
19-2 异步电动机的起动方法.....	49
19-3 深槽和双笼型异步电动机.....	52
19-4 同步电动机的异步起动.....	54
19-5 异步电动机的调速方法.....	55
结语.....	61
习题.....	62
第二十章 单相及特种异步电机	63
20-1 两相异步电动机.....	63
20-2 单相异步电动机.....	65
20-3 电容器电动机.....	68

20-4	感应调压器及移相器	70
20-5	电磁滑差离合器调速的异步电动机	73
	结语	74

第四篇 直流电机

第二十一章	直流电机的工作原理和基本结构	75
21-1	直流电机的工作原理	75
21-2	直流电机的主要结构部件	77
21-3	直流电机的额定值	81
	结语	81
	习题	81
第二十二章	直流电机的电枢绕组	83
22-1	直流电枢绕组的一般知识	83
22-2	单叠绕组	85
22-3	单波绕组	87
22-4	电枢绕组的感应电势	90
22-5	电枢绕组的电磁力矩	91
	结语	92
	习题	93
第二十三章	直流电机的电枢反应及换向	95
23-1	直流电机负载时气隙磁场的分析	95
23-2	直流发电机的电枢反应	97
23-3	直流电动机的电枢反应	99
23-4	直流电机的换向	100
23-5	火花的等级及产生火花的原因	104
23-6	改善换向的方法	106
23-7	环火的产生及其防止措施	108
	结语	110
	习题	110
第二十四章	直流发电机	112
24-1	直流发电机的励磁方式	112
24-2	直流发电机的功率、力矩和电势平衡关系	114
24-3	他励发电机的运行特性	116
24-4	并励发电机的自励条件及运行特性	119
24-5	复励发电机的运行特性	122
24-6	各种直流发电机的应用	123
	结语	124
	习题	124
第二十五章	直流电动机	126

25-1 直流电机的可逆原理.....	126
25-2 直流电动机的功率、力矩和电势平衡关系.....	127
25-3 直流电动机的起动.....	129
25-4 直流电动机的机械特性.....	130
25-5 直流电动机的调速.....	133
结语.....	135
习题.....	135
附录.....	137
习题答案.....	137

第三篇 异步电机

异步电机亦称感应电机,是当代生产量最多、应用也最广泛的一种交流电机。因其结构简单、价格低廉、运行可靠、维护方便,在交流电动机领域取得了绝对优势。

按异步一词定义,凡电机旋转速度有异于气隙旋转磁场转速之任何交流电机,均应包括在内。但实际上现代常用的异步电机这一术语,通常指定转子之间按电磁感应原理而传递能量的感应电机。这类电机多数为三相结构,但也可为单相。三相异步电动机广泛地应用在各种工业上,单相电动机则主要应用于家用电器。无论是三相或是单相电机都具有两套绕组,构成两个电路。接向电源的定子绕组与自成闭合回路的转子绕组彼此相对独立,无任何电的联接,但却都共处于统一的铁磁体系统,彼此交链同一个气隙磁场,磁耦合紧密,相互间电磁感应作用强烈。因此就其电磁原理而言,极类似于一般的两绕组变压器,接电源的定子绕组相当于变压器的原绕组,建立励磁磁场,接受电能输入,自行闭路的转子绕组则相当于变压器的副边。

对于变压器的分析讨论,指导思想是将其归化成为一个电路,即用比较简单的等效电路来模拟一台实际的变压器,以解电路的方法求解变压器的各种运行情况。实践证明,这一处理方法是既简便而又实用。基于异步电机在电磁原理上极类似于变压器的事实,在分析讨论时应可借用其思路,用化为路的方法将实际的异步电机以等效电路来进行模拟。这一点是本篇在分析讨论时的一个主导思想。

当然,异步电机不能说就是变压器,它是个旋转的机械,是电能与机械能可以相互可逆变换的机械,它应该具有自身独特的问题。例如因旋转而必须具备的电磁力矩问题,因旋转而带来的速度控制问题。速度控制包括电机自静止状态转化到正常旋转的起动问题,由一种旋转速度变化到另一种速度的调速问题,以及如何应用电磁力矩与转速作用方向相反而进行制动的问题。这一些问题都是异步电机研究之中所不可缺少的,将在电磁原理分析讨论之后分别地探讨其必要的细节,使之有机地组合成本篇的各个内容。

第十六章 异步电机的基本结构和运行状态

本章先扼要介绍异步电机的主要结构部件。再按异步电机的工作原理来说明它具有三种不同的运行状态：(一)电动机运行；(二)发电机运行；(三)电磁制动运行。最后对异步电动机的额定值作简要说明。

16-1 异步电机的基本结构

可用三相异步电动机来说明其基本结构。三相异步电动机按转子结构不同可分为笼型和绕线型两大类，它的外形和基本结构可参看图16-1。

三相异步电机的主要结构分为定子和转子两大部分。定子槽中嵌有三相对称绕组，转子槽内则嵌有笼条或绕组，它自成闭路不和定子绕组相连接。在定子和转子之间由气隙间隔。定

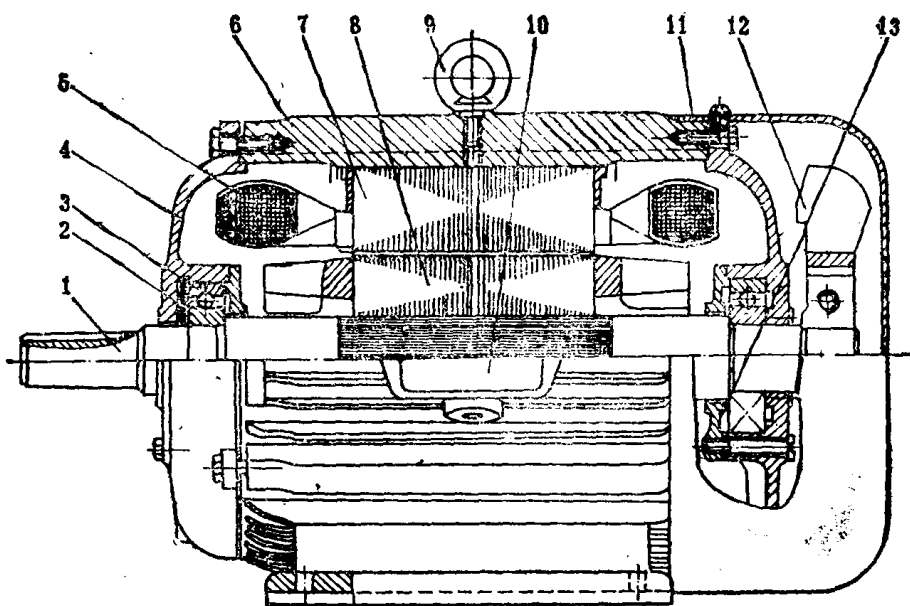


图 16-1 笼型转子异步电动机的结构图

1—轴 2—弹簧片 3—轴承 4—端盖 5—定子绕组 6—机座 7—定子铁心
8—转子铁心 9—吊环 10—出线盒 11—风罩 12—风扇 13—轴承内盖

子、转子的铁心和气隙构成了电机的主磁路。为了减少磁路的磁阻，亦即减少电机的励磁电流，异步电机的气隙长度在机械方面允许的条件下应小一些为好。异步电机的定子铁心固定在机座内，转子则承托在电机两侧端盖的轴承座上，端盖有封闭式和不封闭式。下面就异步电机主要部件作简单介绍。

一、异步电机的定子

异步电机的定子包括硅钢片叠成的铁心、定子绕组和机座三个部分。

定子铁心是异步电机磁路的一部分,由于主磁场以同步速相对定子旋转,为减少在铁心中引起的损耗,铁心采用 0.5 毫米厚高导磁的硅钢片叠成。对中、小型异步电机,当铁心外径小于 1 米时,硅钢片是整张冲制成空心圆筒形,其内圆上有齿、槽相隔,以便在槽内嵌置定子绕组。当铁心外径大于 1 米时,则采用多张扇形片拼成圆筒形。硅钢片两面都涂以绝缘漆以减少铁心的涡流损耗。中、小型异步电机定子铁心的冷却,一般用同轴风扇表面通风,但也有些兼有槽底轴向通风。容量较大的电机,则还用径向通风,即在铁心叠片时,每叠 4~5 厘米厚度即沿钢片的径向安放辐射形的垫条,使片与片之间留有相当于垫条厚度的径向通风道。

定子槽型如图 16-2 所示。对中、小型异步电机,电压低于 500 伏,常采用半闭口槽。而对于高压、大容量异步电机则往往采用开口槽。半闭口槽的优点在于主磁路的磁阻较小,从而减少励磁电流,可改善电机的功率因数。同时也可以减少气隙磁场的脉振,相应减少电机的附加损耗。开口槽由于槽口宽度和槽宽相等,因此能把预制成形的线圈整个放入,所以多用于 6000 伏电压等级,绝缘要求较高的中型和大型高压异步电机。

定子绕组是电机的关键部分,小容量异步电机多采用单层绕组,而容量较大的异步电机,一般都采用双层短矩绕组。异步电机定子绕组的结构和同步电机的定子绕组基本相同。

定子绕组嵌在槽内,对铁心应有可靠的槽绝缘(即对地绝缘),对于低压电机槽绝缘一般采用有聚酯薄膜保护层的青壳纸,即所谓 E 级绝缘。对于高电压、大容量的电机除槽绝缘之外,线圈采用云母带多层包扎的 B 级绝缘,甚至采用热压预制成形的包绝缘线圈。双层线圈还应在上、下层之间加隔相绝缘。槽内线圈嵌置绝缘妥善后,在槽口用槽楔固定封闭。

机座又称机壳,它的主要作用是支撑定子铁心,同时也承受整个电机负载运行时产生的反作用力。它不是电机的磁路部分。中、小型电机的机座通常采用铸铁成型。运行时由于内部损耗所产生的热量,也是通过机座的传导、向外散发冷却。大型电机因机身较大浇铸不便,常用钢板焊接成型。而在机座与铁心间留出空隙作为风道以便冷却通风。机座要有足够的机械强度和刚度,受力而不变形。

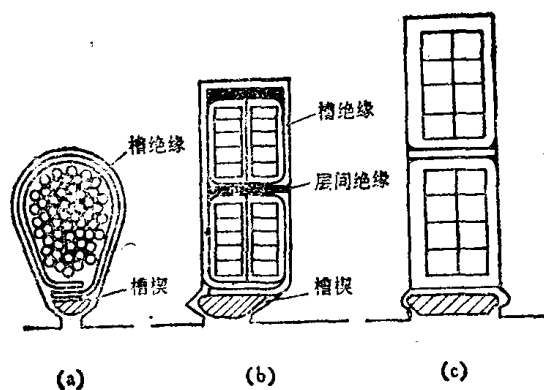


图 16-2 异步电机的定子槽形

(a) 半闭口槽 (b) 半开口槽 (c) 开口槽

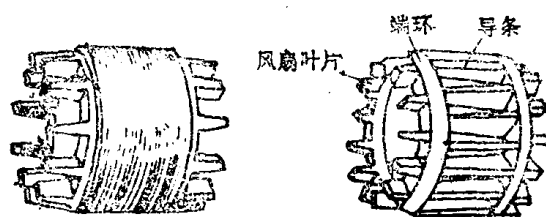


图 16-3 鼠笼式铸铝转子

二、异步电机的转子

异步电机的转子由转子铁心、转子绕组和转轴等组成。

转子铁心也是异步电机主磁路的一部分,常用定子铁心冲剪下来同型号、规格的圆形硅钢片加工叠成,再用热套或用键将它固定在转轴上。大型异步电机的转子铁心,叠装后有的套在

转子支架上。冲剪好的钢片,其外圆上也同样开槽以供放置或浇铸转子绕组之用。

转子绕组是转子的电路部分,它自成闭路不与定子绕组相通,按转子绕组结构的不同,异步电机转子可分为笼型和绕线型两种。

1. 笼型转子绕组

笼型转子绕组结构简单,将导条放置在转子铁心槽内,两端突出部分各用端环短接,所以整个绕组形状似一个笼子。导条、端环可用铜材并焊接使之成一体。一般的中、小型电机,为了节约铜材和简便工艺,常以铝代铜,并用压铸法把熔化的铝铸入,将导条、端环以及风叶,一次浇铸成型。

笼型转子绕组由于感应电势不大且自成闭路,所以它与转子铁心之间无需绝缘。小型异步电机对起动要求不高,因此转子绕组大多采用上述的单笼式。中型和大型异步电机如要求有较大的起动力矩或较好的起动特性,则还可以采用双笼式或深槽式等。也有为了改善电动机的起动性能,有时在转子铁心叠片装配时,把转子的槽口不与转轴平行而是扭转一定角度,采用所谓斜槽的方法。

2. 绕线型转子绕组

绕线型转子绕组和定子绕组相似,它将线圈嵌放在槽内并接成三相对称,一般为星形接法,三个出线端分别焊接在三个同轴旋转、又与轴绝缘的滑环上,然后通过电刷把三相电流从滑环引出来,每相再分别串接到可变电阻箱的一相电阻上,三相阻值同时可调(见图 16-4)。绕线式异步电动机最大的优点在于它起动时转子绕组可接外电阻,使电动机获得较大的起动力矩,并降低了起动电流,使电动机的起动特性得以改善。如果设计得当,还可以通过改变电阻器阻值达到对电动机调速。常见变阻器仅作起动之用,在转速达到额定值时,通过机械装置将三个滑环短接使转子绕组自行闭路,同时将刷握提起使电刷离开滑环。绕线式电动机通常用在中等容量的电动机中,但由于制造工艺复杂,成本高,也由于现代电网容量增大,允许单机直接起动容量增大,一般电动机大多可以采用直接起动,故除非调速需要,绕线式电动机的使用已趋减少。

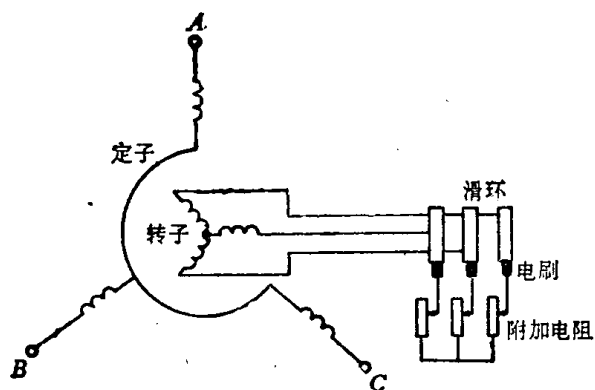


图 16-4 绕线型异步电动机接线示意图

16-2 异步电机的工作原理及三种运行状态

异步电机在电磁原理上类似于变压器,它的三相定子绕组相当于变压器的原绕组,转子绕组则相当于变压器的副绕组。通过电磁感应作用沟通了原副方的能量传递。所不同的是异步电机的磁场是一个旋转磁场,在这个主磁场的旋转下,转子导体将受到电磁力,在圆柱形的转子上建立电磁力矩,促使转子运动,所以有可能使电能转变为机械能。电磁力矩的大小取决于转子电流的有功分量数值与气隙磁场的磁密数值。实际上气隙磁场基本不变,所以电磁力矩大小与转子电流数值密切相关。电磁力矩的方向则由磁场在空间的作用方向与电流方向共同决定。因为转子是旋转的,假定其转速为 n ,则旋转磁场相对于转子导体的切割速度,将取决

于磁场转速 n_1 与转子速度 n 的转速差,而切割方向也与这个转速差有关。转子绕组本身是自行闭路的,切割速度将直接影响转子电流的大小,所以异步电机的电磁力矩实际上与转速差 $(n_1 - n)$ 密切相关。

习惯上采用转速差的相对值来表示,定义为转差率,其定义式为

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1 - \frac{n}{n_1}$$

转子速度 n 不同,相应转差率 s 亦不同,据不同的转速与转差率,可区别出异步电机三种不同的运行状态。这三种状态的区分均与电磁力矩相关,现分述如下:

一、转子转向与气隙磁场转向相同,但转速 n 小于磁场转速 n_1 ,即 $0 < n < n_1$ 或 $1 > s > 0$ 状态

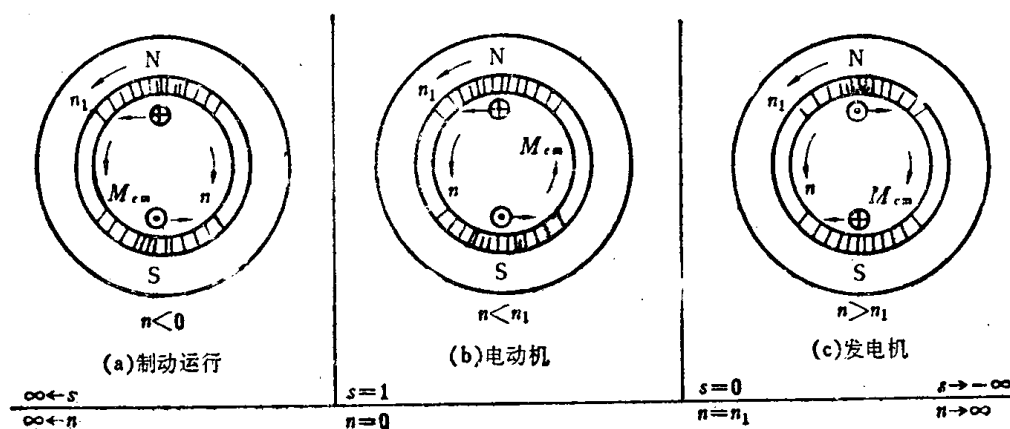


图 16-5 异步电机的三种运行状态

图 16-5 b 所示为气隙旋转磁场的 N 极刚好转到上方、S 极则在下方的瞬间。旋转磁场的作用除在定子绕组感应电势 e_1 外,还将以 $(n_1 - n)$ 的相对转速逆时针切割转子绕组,感应电势 e_2 ,因此定子和转子的电势方向相同。由于转子绕组短接,转子绕组中便有电流流通,它的方向接近与电势 e_2 相同。图中 i_2 的方向用符号 $\oplus$ 或 $\ominus$ 来表示。

根据磁通与电流的方向,用左手定则可以看见:转子将产生一个与旋转磁场同方向的电磁力矩,如果这个力矩足以克服负载阻力矩,便能使转子按磁场转向旋转,输出机械功率。

以上说明异步电机是处于电动机的运行状态。

二、转子与气隙旋转磁场同方向旋转,且转速 n 高于同步转速 n_1 ,即 $n > n_1$ 或 $s < 0$ 的状态

异步电机作为电动机运行,转速总是低于同步转速。如果 $n = n_1$,则转子绕组中将不感应电势,也没有电流,力矩便等于零。但是,如图 16-5 c 所示,应用一台原动机拖动异步电机使转子和磁场同向旋转且转速 n 大于同步转速 n_1 ,旋转磁场便将以 $(n - n_1)$ 的相对转速顺时针方向切割转子绕组,和上一节对比,磁场切割转子导线的方向相反,转子绕组中的电势 e_2 、电流 i_2 也都改变方向,最终产生的电磁力矩也将是和旋转磁场以及转子旋转的方向相反,这样,电磁力矩便属制动力矩性质,因此原动机要保持它在这个情况下继续转动,就必需输入机械功率。

以上说明异步电机是处于发电机的运行状态。

三、转子与定子旋转磁场反方向旋转,即 $n < 0$ 或 $s > 1$ 的状态

如果用其他机械拖动电机使其转子与旋转磁场相反的方向旋转,例如在起吊超重的机械负载又无倒转制动就会使转子倒转。这时旋转磁场便将以 $(n_1 + n)$ 的转速逆时针切割转子绕组,和第一节电动机的电磁效应一样,其力矩的方向仍保持旋转磁场的方向,但却与转子转向相反,这个电磁力矩的性质将对转子和拖动它的机械起制动作用。

由于转子电流方向没有改变,定子侧电流仍和电动机运行时同样方向,于是电功率仍从电网输入。异步电机便处在电磁制动的运行状态。

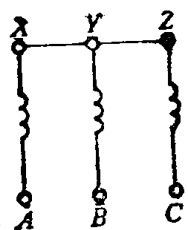
可见,异步电机可以作为电动机、发电机和电磁制动三种状态运行,但主要作为电动机被广泛应用。仅农村小型水力、风力电站中,有时用作发电机运行,至于异步电机作为电磁制动运行,以往多用来作为交流起重机下放重物时的减速措施,但目前已很少采用。

16-3 异步电动机的额定值

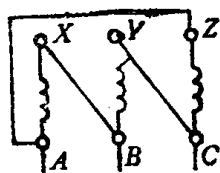
每台异步电动机都在机壳上装有名牌,把它的运行额定值印刻在上面,它主要包括下列内容:

1. 额定电压 U_N 指电动机运行时接入的线电压;单位为伏或千伏。
2. 额定电流 I_N 指电动机在额定电压下,轴上输出额定力矩时定子绕组的线电流;单位为安。
3. 额定频率 f 电动机应接的电源频率;我国工频电网规定为 50 赫。
4. 额定功率 P_N 指电动机在额定条件下运行时,轴上输出的机械功率;单位为千瓦,对三相异步电机,额定功率应如下式:

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



(a)星形连接



(b)三角形连接

图 16-6 三相异步电动机的接线板

5. 额定转速 n_N 指电动机在额定电压和频率下满载运行时转子应有的每分钟转速。

6. 额定功率因数 $\cos \varphi_N$ 指电动机在额定情况下运行时的功率因数。

7. 电动机效率 η_N 指电动机在额定情况下运行时的效率。

此外一般还在名牌上标出:定子相数、绕组接法、绝缘等级。对绕线式异步电动机有时还标出转子绕组接法,转子电压(转子开路而定子加额定电压测得的滑环间电压),额定运行时转子电流等。

异步电动机的外壳装有接线板,可以用来引接电源进线,同时异步电动机定子三相绕组的六个端点也全都接到接线板上,其端点排列如图

16-6 所示。这样,改变板面上端点连接可使定子绕组接成星形或三角形,以便允许电动机运

行在两种不同的电源电压。有时可将定子绕组六个端点全部引出接起动器以改善起动性能。

结 语

异步电机的主要结构也是分定子、转子两大部分，定子部分与同步电机相似，主要是带槽的叠片铁心 and 对称的三相绕组，仅机壳多用铸铁件。转子可分为笼型与绕线型两大类，笼型转子常见为铸铝单笼，在要求起动力矩大、工作可靠条件下用深槽与双笼结构采用铜导条与端环。绕线型结构绕组与定子一样，三相成型线圈，多用半匝导杆，接成波绕组形式。

异步电机的额定值必须注意其额定功率是指输出功率，而乘积 $\sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N$ 则是输入功率，两者不等，相差部分是各种损耗。凡额定电压与电流均指线压与线流，不能搞错。

以转差率或转速来划分异步电机运行状态，有三种结果。记住电动机状态的条件是 $0 < s < 1.0$ ，对应 $n_1 < n < 0$ 。当 $s < 0$ 即 $n > n_1$ ，是为发电机。 $s > 1$ 即 n 为负，逆磁场转向旋转时则为电磁制动运行。在电动机状态，电磁力矩作用方向与转子转向一致，是此力矩作用下使电机旋转，属电动机运行。另两种运行状态，电磁力矩均起制动作用。

习 题

1. 何谓转差率？试写出其定义。异步电机按转差率不同可分为哪几种运行状态？试道其详。

2. 异步电机在作发电机及电磁制动运行时，电磁力矩与转子转向间关系如何？怎样区分这两种运行状态？

3. 额定频率 50 赫、转速 1475 转/分的异步电动机，试问其极对数、气隙磁场转速、转差率各是多少？

4. 三相 Y 接法额定电压 380 伏，额定功率 15 千瓦，功率因数 0.85（滞后），效率 92% 的异步电动机，试计算其额定电流。若上述数据不变，定子绕组改作 Δ 接法，额定电流改变否？若上述数据不变，电机以发电机运行，则定子绕组作 Y 或 Δ 接法时，额定电流又如何？

第十七章 异步电机的运行原理

分析异步电机运行原理,着重在其基本电磁关系,目的是展示其内在矛盾。

电机是机械能与电能可逆转换的机械,此种转换借助于电机内的电、磁及机械力三者之间的相互关系而进行。三者之间的相互依赖、相互联系又相互对立的特殊关系,是整机分析的中心问题。本章分析的重点在于电磁关系各种环节,机械力与电磁力矩问题则在下一章专题讨论。

异步电机内部,彼此独立的定、转子电路有各自的变化规律,但两电路又共处于统一的磁场作用下,藉磁场的耦合作用而致相互沟通、相互影响。独立的定、转子电路,由此取得有机联系,沟通了能量交换的渠道。当转子方发生有能量的改变,经过公共磁场的耦合作用反映到定子一方,得到电源能量的增减,获得能量守恒。

在研究电磁关系的同时,还应注意解决定量计算问题,异步电机通常所用的解算方法与变压器类似,即将其化为等效电路,以解电路方式来解决具体计算。因而本章在分析的同时处处环绕如何用一电路来模拟电机的处理方法。再考虑到异步电机以用作电动机为主,故在分析时以电动机运行作为主要对象。异步电机分析方法有多种,本章所用的等效静转子法是较简便的一种,因其最接近于变压器的分析,便于借用许多已熟悉的概念,是其优点。

在具体分析电机运行时,首先着重讨论某些特定条件下的运行状况,目的在于排除一些次要因素,突出某一个方面的特定规律,便于较深刻地理解与掌握,然后再在这些基础上综合归纳,扩大到一般运行状态。

17-1 转子电流为零时的异步电机

假定电机定子电路接到相电压为 $\dot{U}_1$ 、频率为 f_1 的三相交流电源,转子电路电流为零。可设想此时转子电路开路。这一假定的目的是为了先排除转子电流对定子的影响,突出定子电路自身的内在规律。在此假定下,因转子无电流,不产生电磁力矩,转子不会转动,也没有机械功率输出。

为便于讨论,把异步电机表示成如图 17-1 的电磁模型。在这个图上只画出定、转子绕组的一相,它们的绕组轴线即相轴在空间是重合的。为了对这两个相绕组建立起电路方程,还在图上规定了各个物理量的正方向。如图所示,对电流、电势等量在 A 或 a 导体处以穿入纸面为正,相应地在 X 或 x 处以穿出为正。这样由电流产生的磁势或磁通,就以和轴线重合方向为正。若是旋转磁场则其转向规定逆钟向旋转为正。

现在就电机接电源后产生一系列电磁现象的过程,探讨其电磁关系。

定子电路在电压 $\dot{U}_1$ 作用下引进一电流,因转子无输出,此

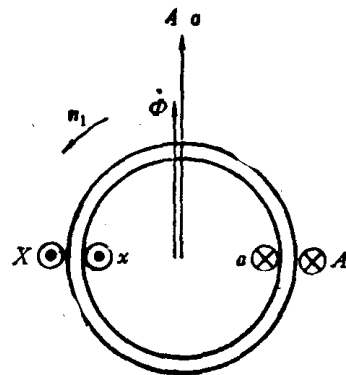


图 17-1 异步电机电磁模型

电流主要作用是在机内建立磁场,可称作励磁电流,用符号 $\dot{I}_0$ 表示。由 $\dot{I}_0$ 建立的磁力线可分作两部分,绝大部分磁力线穿过气隙、交链到转子电路然后回到定子边自行闭合,这是主磁通 $\dot{\Phi}$,也称为互感磁通。应注意到主磁通是三相电流共同建立的,它的磁路为三相电流所形成磁场的公共磁路,经过定、转子铁心,穿越两个气隙。这是一个恒幅、恒速、在空间作正弦分布的基波旋转磁场,但对于轴线固定的两个绕组电路来说,所匝链的磁通量数值却是一个时间变量。另有一小部分磁力线则仅与定子绕组本身交链,称为漏磁通。图 17-2 是主磁通和漏磁通在槽部的情况。由图可见,定子漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 只和定子 A 相绕组本身相链而不涉及转子电路。所以可认为 $\Phi_{1\sigma}$ 仅由 A 相电流所引起,它将和励磁电流同频率、同相位地随时间交变。所以无论是主磁通或漏磁通都将在定、转子相应的电路中引起电势。当然定子的漏磁通对转子不发生影响。

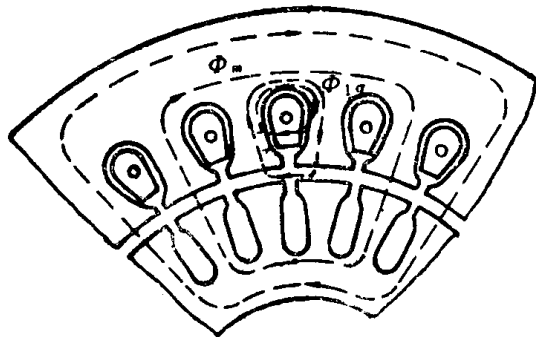


图 17-2 主磁通与漏磁通示意图

因为轴线固定的静止电路所匝链的主磁通是一时间变量,因而引起主电势。与变压器一样,电势在时间上落后于相应的磁通 90° 电角。如图 17-1 所示瞬间,磁通位于 A 轴,绕组匝链磁通最大,是 Φ 为最大值时刻,但此刻磁通的时间变率为零,因而电势为零。过 90° 时间后,磁通应位于水平位置且指向 X,绕组匝链磁通为零,但磁通的时间变率最大,且为负值,因而绕组电势应达正的最大值,其方向在 A 为穿入,在 X 为穿出,表明了绕组电路感应的电势在时间上落后于所匝链的磁通 90° 相位。如果用切割原理解释磁通和电势的相位关系可得相同结果。

将电势与磁通均以复数表示,则得

$$\dot{E}_1 = -j\sqrt{2} \pi f_1 W_1 k_{w1} \dot{\Phi} \quad (17-1)$$

$$\dot{E}_2 = -j\sqrt{2} \pi f_1 W_2 k_{w2} \dot{\Phi} \quad (17-2)$$

两电势有效值之比称为电势变化,即

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1 k_{w1}}{W_2 k_{w2}} \quad (17-3)$$

可将匝数和绕组系数的乘积看成是一个绕组的有效匝数,则可认为电势比应是有效匝数之比。这是一种普遍说法,也包括了变压器在内。因为变压器的线圈不存在短距与分布问题,绕组系数等于 1,故电势比直接是匝数比。

漏磁通在电机中远比变压器中复杂,有槽漏磁、端部漏磁和气隙差别漏磁几个部分。空间的高次谐波磁场在绕组中引起电势的效应,也列为谐波漏磁而归入差别漏磁之中。对漏磁的深入分析不属本书范围,但须提出,无论何种漏磁,其磁路主要是空气而不是铁磁物质,都是线性磁路。所以漏磁通所引起的电势将直接正比于建立它的电流,且在相位上落后于电流 90° 电角。仿照变压器处理方式,可引入漏磁电抗 $x_{1\sigma}$ 而将电势写成电压降形式,即

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j \dot{I}_0 x_{1\sigma} \quad (17-4)$$

因 A 相电路本身还有电阻 r_1 , 电流 $\dot{I}_0$ 还将产生电阻压降 $\dot{I}_0 r_1$ 。合并上述两项,可认为 A 相绕组电路由 $\dot{I}_0$ 引起的阻抗压降为

$$\dot{I}_0 r_1 + j \dot{I}_0 x_{1\sigma} = \dot{I}_0 Z_1 \quad (17-5)$$

式中 $Z_1 = r_1 + jx_{1\sigma}$ ，称为定子电路每相漏阻抗，其意义和变压器中的原方漏阻抗相类似。如把 r_1 和 $x_{1\sigma}$ 作为集中参数考虑，再计及串联电路阻抗允许移动，则两绕组中只有电势 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$ 。这一观点事实上就是把电阻和漏抗的作用从定子绕组中分离，把它移动到电路的进线端。

现在，可以把电机的工作状态用图 17-3 来表示。根据此电路的规定正方向，可得定子电路的电压方程

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \quad (17-5)$$

式中的电势 E_1 习惯称为“反电势”，因为该式表明 E_1 数值愈大则电流 I_0 数值愈小， E_1 的作用是力图阻止 I_0 的流入，这一现象实质上就是楞次定律。

仿照变压器处理方法，可以引入一个励磁电抗 x_m 而将电势写成电压降形式。所引入的电抗 x_m 与前述的漏抗 $x_{1\sigma}$ 大不一样，因为建立电势 E_1 的是主磁通 Φ ，它的磁路中绝大部分是铁磁物质，只有两个微小的气隙。这样的磁路受铁磁材料的影响极大，其导磁率较空气大许多倍，并且受铁磁物质饱和的影响，磁路是非线性的。这就决定了励磁电抗 x_m 的特殊性。首先是 x_m 的数值远大于 $x_{1\sigma}$ ，其次是 x_m 将不是一个常值。当磁路饱和度较高，则导磁率降低， x_m 变小。磁路如不饱和，则导磁率较高， x_m 变大。只有在磁路的工作点不变，即恒值磁通，因而电势 E_1 恒定的条件下， x_m 才可用一常数表达。所以将 E_1 用电压降形式来表达是有条件的，这就是要求磁路工作点不变，即要求铁心磁通 Φ 为常数。如果近似地不计在 Z_1 上的微小电压降，则从有效值而言有 $U_1 \approx E_1 = \sqrt{2} \pi f W_1 k_{w1} \Phi$ 。由之可见，这一条件最后可归结为系统有恒频、恒压的工作状态。这就是说当异步电机在恒频恒压的工作条件下，将允许引入一个常数的电抗 x_m ，将电势写成电压降形式。

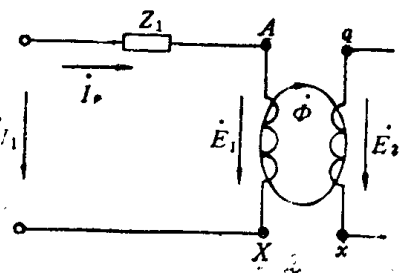


图 17-3 将 Z_1 移出到端点的电路

上面的讨论都是把电流 I_0 纯粹当作用来建立电机中磁场所需的电流，认为它是一个完全的无功电流。但在实际电机中这一情况并不存在。因为当磁场旋转时，铁心的每一点都处在随时间变化的磁场作用之下，铁心中必然出现涡流效应和因反复磁化而产生的磁滞损耗，涡流和磁滞损耗合成为铁损耗，它消耗一部分有功功率使铁心发热。这说明电机在建立磁场的同时还必然伴随了有功能量的消耗，不可能单纯地只具有无功电流。所以应该确认电流 $\dot{I}_0$ 之中除了单纯用来建立磁场的磁化电流 $\dot{I}_\mu$ 之外还应该有一个有功的铁耗电流 $\dot{I}_{fe}$ 。所以磁通相量 $\dot{\Phi}$ 只应和磁化电流相量 $\dot{I}_\mu$ 同相位而应该落后于总的励磁电流 $\dot{I}_0$ 以铁耗角 α_{fe} 。铁耗电流相量 $\dot{I}_{fe}$ 的大小，直接影响到 α_{fe} 的数值。在图 17-4 的异步电机转子电流为零时的相量图上，清楚地表示了这些电流间的关系。这一相量图按下述方法画出，

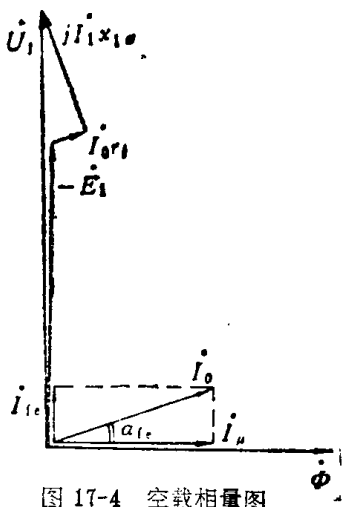


图 17-4 空载相量图

取 A 相绕组所匝链的磁通 $\dot{\Phi}$ 作为参考量画在水平位置，在旋转的磁场下， A 相绕组所匝链的磁力线是一时间变量，所以 $\dot{\Phi}$ 相量是一个时间相量。相量 $\dot{E}_1$ 应落后于 $\dot{\Phi}$ 90° 电角而 $-\dot{E}_1$ 则应超前 90° 电角。电流 $\dot{I}_0$ 相量应超前于 $\dot{\Phi}$ 角度 α_{fe} ， $\dot{I}_\mu$ 与 $\dot{\Phi}$ 同相而 $\dot{I}_{fe}$ 则与 $-\dot{E}_1$ 同相。于 $-\dot{E}_1$ 相量端点加上阻抗压降 $\dot{I}_0 Z_1 = \dot{I}_0 r_1 + j \dot{I}_0 x_{1\sigma}$ 。即得端电压相量 $\dot{U}_1$ 。

上述情况表明，单纯地把 E_1 写成仅有与 x_m 有关的压降形式并不确切，它未能反映在建立磁场的同时还伴随铁耗的客观事实。应该再在电路中引入等效的电阻 r_m 和 x_m 串联，

使电流 I_0 流过 r_m 时产生的有功损耗 $I_0^2 r_m$ 与每相铁耗相等, 用 r_m 这一电阻代表铁耗相应的电阻, 而将 $\dot{E}_1$ 写成

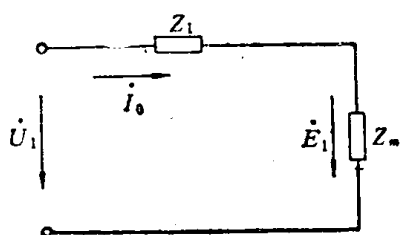


图 17-5 空载等效电路

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_0(r_m + jx_m) = -\dot{I}_0 Z_m \quad (17-6)$$

这里 $Z_m = r_m + jx_m$ 称为励磁阻抗, 其意义与变压器分析时相同。经过这样处理, 图17-3可化成如图17-5所示的等效电路。由图可见, 这个电路和变压器空载状态完全一致, 所以异步电机在转子方电流为零的工作状态, 可称为理想的空载运行状态。实际上笼型转子的异步电机特别是铸铝结构转子, 说令转子绕组开路是办不到的, 但转子电流为

零的状态则仍可出现。例如当转子速度达到同步转速 n_1 , 转差率 $s=0$, 转子与气隙中旋转磁场以同速、同向地同步旋转, 没有相对运动, 闭路的转子绕组中将不感生任何电流。所以, 异步电机在 $n=n_1$, $s=0$ 的工作状态, 常称为理想空载状态。称之为理想空载, 是因为即使电机轴上无任何负载而空转, 实际电机的转差率也达不到 $s=0$ 这一极限值。

转子电流为零时的运行分析, 至此告一段落。接着应探讨转子有电流时的工作状态。如转子电路有了电流, 则首先出现的是转子电流通过绕组所发生的转子磁势, 这时在气隙空间将有定子磁势与转子磁势的互作用, 会产生一个气隙的合成磁势。如果每个磁势在空间都按正弦律分布, 可用空间矢量表示, 则磁势的合成或分解可用矢量的加减方式进行。在同步电机中已提出了时间相量与空间矢量合一的概念, 所以还可把磁势表示成时间相量, 最后化为电流时间相量表示的磁势平衡关系。

17-2 转子静止时的异步电机

设异步电机的转子绕组闭路, 如笼型绕组。现卡住转子不令转动, 转速 $n=0$ 。这是为了暂不计及机械功率的变化, 而突出定、转子两个电路间的相互联系、相互影响的内在规律。当转子电路闭路并在 $n=0$ 条件下, 转子电势 $\dot{E}_2$ 和 $\dot{E}_1$ 具有相同的频率 f_1 。在 $\dot{E}_2$ 作用下转子出现频率为 f_1 的电流 $\dot{I}_2$, 由 $\dot{I}_2$ 产生的磁效应主要作用于电机的公共磁路, 因为转子和定子一样是静止的, 双方电流的频率又一样, 相序排列也相同, 结果是双方的磁势在气隙空间同速同向地旋转, 处于相对静止状态。这证明电流 $\dot{I}_2$ 的出现首先是影响到气隙磁场, 然后再影响到定子方电流 $\dot{I}_1$, 使之发生改变。可以说: 是磁耦合沟通了定、转子双方, 它们间的联系必将以磁势平衡的形式出现。

从电路方面看, 转子有电流 $\dot{I}_2$ 之后除了发生电阻压降 $\dot{I}_2 r_2$ 之外, $\dot{I}_2$ 产生的漏磁通也将在绕组中发生漏磁电势 $\dot{E}_{2\sigma}$ 。仿照定子方并取相同的处理方法, 即引入漏磁电抗 $x_{2\sigma}$ 。把电势写成电压降形式, 则有

$$\dot{E}_{2\sigma} = -j\dot{I}_2 x_{2\sigma} \quad (17-7)$$

当定、转子电路都有电流时, 可这样考虑问题:

(1) 气隙中的主磁通是双方电流共同建立的, 在此磁通作用下, 两个电路感生电势 $\dot{E}_1$ 与 $\dot{E}_2$, 两电势与磁通关系仍服从 (17-1) 式及 (17-2) 式规律。

(2) 双方电流彼此在电路中发生的电压降仍是两部分, 即电阻和漏抗压降, 以复阻

抗 $Z_1 = r_1 + jx_{1\sigma}$ 和 $Z_2 = r_2 + jx_{2\sigma}$ 表示, 得定、转子电路压降为 $\dot{I}_1 Z_1$ 和 $\dot{I}_2 Z_2$ 。可作出如图 17-6 所示的电路来模拟目前条件下的电机, 并据图示的规定正方向, 得方程

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \quad (17-8)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 Z_2 \quad (17-9)$$

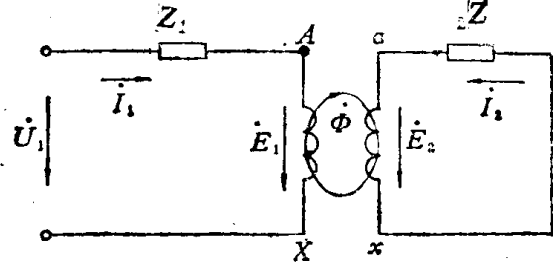


图 17-6 转子静止时的模拟电路

现在再来研究双方电流所建立磁势的相互关系。因双方磁势在气隙空间同速同向旋转, 相对静止, 两个基波磁势都是空间矢量, 可得矢量和的合成磁势

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_m \quad (17-10)$$

合成磁势 F_m 建立气隙主磁通 Φ 。如转子无电流则 F_2 为零, 合成磁势 $F_m = F_1 = F_0$, 说明 F_m 应属于定子电流建立, 在理想空载时即等于 I_0 电流所建立的磁势 F_0 。在一般负载状态, 因 Z_1 复模较小, 标么值 $z_1^* \leq 0.1$, 即满载压降 $\dot{I}_1^* z_1^* \leq 0.1$ 。并且相量 $\dot{I}_1 Z_1$ 与 $(-\dot{E}_1)$ 一般不同相位, 故 $U_1 \approx E_1$ 大致仍成立。这表明在恒频恒压时异步电动机气隙磁通大致可认为不变。于是可推论: 合成磁势 F_m 的数值应与理想空载时磁势 F_0 相近。说两磁势值完全相同当然不严格, 特别对于 $I_1 Z_1$ 相对较大的小容量电机, 其 E_1 值难以维持不变, 负载增大时其值变小些。但在定性分析时可认为磁势近于不变, 并因此简化了许多枝节说明。

因磁势 F_1 系定子电流 I_1 建立, 且 $F_1 = \frac{\sqrt{2} m_1}{\pi p} I_1 W_1 k_{w1}$, 在时、空矢量图上 $\vec{F}_1$ 与 $\vec{I}_1$

相重合。同理, 有 $F_2 = \frac{\sqrt{2} m_2}{\pi p} I_2 W_2 k_{w2}$ 以及 $F_m = \frac{\sqrt{2} m_1}{\pi p} I_m W_1 k_{w1}$ 关系, 且时、空矢量图上 $\vec{F}_2$ 和 $\vec{F}_m$ 分别与 $\vec{I}_2$ 和 $\vec{I}_m$ 重合。故以电流形式来表示磁势时, 可得

$$m_1 k_{w1} W_1 \dot{I}_1 + m_2 k_{w2} W_2 \dot{I}_2 = m_1 k_{w1} W_1 \dot{I}_m \quad (17-11)$$

同除以 $m_1 k_{w1} W_1$ 化为

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_m \approx \dot{I}_0 \quad (17-12)$$

其中 $\dot{I}'_2$ 代表在磁势 F_2 数值不变时用定子方电流来表示的转子电流折算值。 $\dot{I}'_2$ 与 $\dot{I}_2$ 在量值上的折算关系为

$$\frac{I_2}{I'_2} = \frac{m_1 k_{w1} W_1}{m_2 k_{w2} W_2} = \frac{m_1}{m_2} k_e = k_i \quad (17-13)$$

此式中的 k_i 称为电流变比, 如为绕线型转子电机, 定、转子相数相同即 $m_1 = m_2 = 3$, 则 $k_i = k_e$, 两者均是有效匝数比。

从 (17-10) 式变换到 (17-12) 式无非是用电流的时间相量来代替磁势的空间矢量, 不改变性质, 故 (17-12) 式称为电流形式的磁势平衡方程。这一方程联系了定、转子电路, 表示出相互间的影响及依存, 也沟通了能量传递的渠道。

据 (17-12) 式改写电流关系, 得: $\dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}'_2)$, 如转子无电流, 即 $\dot{I}'_2 = 0$, 此时在转子电路中不存在任何能量消耗, 则电流 $\dot{I}_1 = \dot{I}_m \approx \dot{I}_0$ 。表明了电机只向电源提取建立磁场和供应铁耗所需的能量。如 $\dot{I}'_2 \neq 0$, 即转子有能量消耗, 则 $\dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}'_2)$, 此时定子不仅向电源提取建立磁场和供应铁耗的能量, 还必须再引进一个足以平衡转子磁势 $\vec{F}_2$ 所需的电流