

# 异步电机发电

李润生 潘根



**异步电机发电**

李润生 潘根

\*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 32开本 4.75印张 102千字

1982年7月第一版 1982年7月北京第一次印刷

印数 00001—15500册 定价 0.42元

书号 15036·4329

---

## 前 言

电的重要性是众所周知的，各行各业都离不开它。建国以来，我国的电力虽已有了大幅度的增长，但因其它各项事业也在迅猛发展，对电力的需求量越来越大，所以始终是供不应求的。农业用电尤感不足，特别是离电网较远的偏僻山村。如要指望在近期内由大电网来供电，则往往不大现实。实践证明，开发各种分散的小能源，采用异步电机来发电，是解决农业用电问题的有效辅助手段。对于偏僻的山村来说，在近期内，异步电机发电甚至有可能是解决用电问题的主要途径。能源是多种多样的，不仅油、煤可用于发电，水力、风力、潮汐、沼气等等，也都可以作为发电的原动力。建造小型异步电机发电站，投资少，收效快，大有可为。

一九五八年，我国已有一些单位试用异步电机来发电，但未能迅速地发展，其主要原因是在于缺少系统的和可靠的技术资料。已有的资料都是零零星星，介绍发电原理时多半是过于简略。各种资料上都给出了一些公式和经验数据，但很不一致，各资料中都不交代公式的来历，而所给出的数据又往往相差四、五倍，使读者无所适从。有些资料在基本概念方面和关键性的数据方面有错误，照着去做就会出事故。因此，我们决定写这本书，以澄清是非，供有关人员参考。

全书共分为七章。第一、二章由潘根编写，其余五章主要由李润生编写。最后相互传阅、修改、定稿。

在写作过程中，我们曾征求过三部分人的意见。生产岗

位上的工人同志和农村电工同志，希望这本书能针对实际问题来写，以图表代替公式，便于查用；技术员则希望该书以原理、公式、运行等为重点，深入阐述，以补现有资料之缺；基层负责同志和管电部门的行政领导同志认为，该书不仅要介绍技术知识，还要介绍一些如何搞好异步机发电的经验。因此，我们不得不采取兼顾的办法，让不同的读者都有选择的余地。

我们两人的专业特长都不是在发电方面，书中错误和不当之处在所难免，敬希读者批评指正。

在本书的编写过程中，河北省邯郸电力局、涉县电力局曾给予热情的关怀和有力的支持。特别是涉县电力局王春堂等同志，为本书提供了主要的实践依据。另外，涉县电力局崔全才同志、山西省临汾纺织印染厂赵乃昌同志、天津电气传动设计研究所杨庆生同志、河北省青龙县水利局刘锡纯同志、河南省新乡地区电业局范清霖同志、河南省安阳地区电业局韩瀑滨同志、河南省扶沟县电业局韩欣锡同志，也曾提供过一些参考数据或宝贵意见，在此一并致谢。

作 者

1980.1

# 目 录

## 前 言

第一章 异步电机的发电原理 .....	1
第一节 异步电机简介 .....	1
第二节 发电的逻辑过程 .....	6
第三节 发电的必要条件 .....	9
第四节 两种激磁方式 .....	10
第二章 激磁电容 .....	13
第一节 激磁电容的作用 .....	13
第二节 异步电机的阻抗 .....	20
第三节 激磁电容公式的导出 .....	25
第四节 激磁电容公式的应用 .....	34
第三章 电容器的运用 .....	47
第一节 电容器的运用原则 .....	47
第二节 电容器的连接 .....	52
第三节 电容量和额定电压的测量 .....	59
第四节 电容器的选用 .....	60
第五节 电容器的安装和运行 .....	67
第六节 电容器的现场检修 .....	71
第四章 自激发电的电路特性 .....	74
第一节 主接线和设备 .....	74
第二节 空载特性 .....	78
第三节 负载调整特性 .....	86
第四节 电能的质量问题 .....	94
第五章 操作和运行 .....	98
第一节 自激发电的操作顺序 .....	98

第二节	失磁的处理 .....	101
第三节	并列运行 .....	103
第四节	接灯照明问题 .....	105
第五节	动力负载问题 .....	110
第六节	安全设施 .....	116
第六章	过电压问题 .....	119
第一节	过电压的起因 .....	119
第二节	设备配置及选择 .....	121
第三节	过电压处理 .....	126
第四节	运行对策 .....	128
第七章	怎样搞好异步机发电 .....	131
第一节	异步机发电的优点和成效 .....	131
第二节	培训技术队伍 .....	133
第三节	分阶段发展 .....	134
第四节	因地制宜 .....	136
附录	.....	140
1.	农村常用水轮机规格表 .....	140
2.	水轮泵规格表 .....	141
3.	微型整装水轮发电机组规格表 .....	141
4.	低压避雷器规格表 .....	141
5.	移相电容器规格表 .....	142
参考资料	.....	143

# 第一章 异步电机的发电原理

在这一章里,我们将扼要地介绍鼠笼式异步电机的结构、极数与转速的关系、绕组的接法、发电的逻辑过程以及两种激磁方式。

## 第一节 异步电机简介

### 1. 电机

发电机和电动机统称为电机,前者的作用是将机械能转化为电能,后者的作用是将电能转化为机械能。从结构上来看,它们并没有什么不同。

电机有直流的和交流的两大类,其中以交流电机为主。交流电机又可分为同步的和异步的两大类。最常见的发电机是属于同步电机,最常见的电动机是异步电动机(简称异步电机)。异步电机有两种型式:一是鼠笼式,二是滑环式。农村用的几乎全是鼠笼式。

各种电机的结构和工作原理,一般电工书上都有介绍,所以本书不打算分门别类地作系统而全面的介绍,只准备扼要地提一提鼠笼式电机的结构、绕组的接法、磁极对数与转速的关系、相电压与线电压的关系、相电流与线电流的关系等。

### 2. 鼠笼式异步电机

鼠笼式异步电机(以下简称异步机)的外形如图 1-1 所

示。它由两部分组成：固定不动的部分叫做“定子”，可以转动的部分叫做“转子”。定子中有三组线圈，绕在硅钢片的芯子上。这些线圈能够将电能转化为磁能，或是将磁能转化为电能，起着枢纽的作用，所以定子又称为“电枢”。转子是被定子环抱着〔如图 1-2 (a) 所示〕，它的主体是导条和短路环〔如图 1-2 (b) 所示〕，都是用电解铜或铝制成的。这种结构有点象速松鼠的笼子，“鼠笼式”就是由此而得名。实际异步机的转子中，除了有导条和短路环而外，还有一个由硅钢片叠成的铁芯，用以增强磁场。

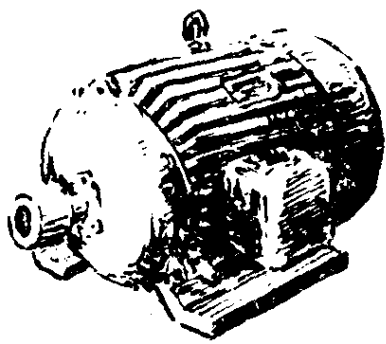


图 1-1

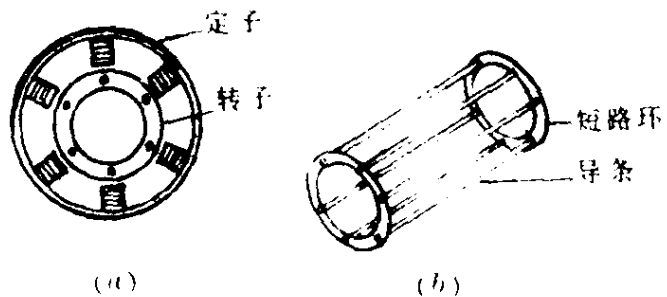


图 1-2

当定子绕组中通以三相交变电流时，便造成一个旋转的磁场，磁场旋转的结果是造成涡漩电场，涡漩电场使转子的导条中出现电流，该电流受到磁场的作用而产生转动力矩，驱使转子转动。这就是异步机作为电动机使用时的工作原理。反之，如果转子是因受到来自某种原动机的机械力矩的作用而转动，并且其转速大于磁场的转速，那么定子绕组中就会出现感应电动势。这时候，异步机就成为发电机了。

转子的转速与磁场的转速通常是不同的。两者的步调有差异，故称“异步”。

如果转子的转速与磁场的转速相同，便叫作“同步”，磁



场的转速被称为“同步转速”。

### 3. “相”量和“线”量

异步机定子的三个绕组可以接成三角形〔简称为“角接”，如图1-3(a)所示〕，也可以接成星形（简称为“星接”，如图1-3(b)所示）。三根对称的引出线  $a$ 、 $b$ 、 $c$  叫做“相线”。每一个绕组两端的电压叫做“相电压”，绕组内所流过的电流叫做“相电流”。任意两根相线之间的电压叫做“线电压”，相线中的电流叫做“线电流”。

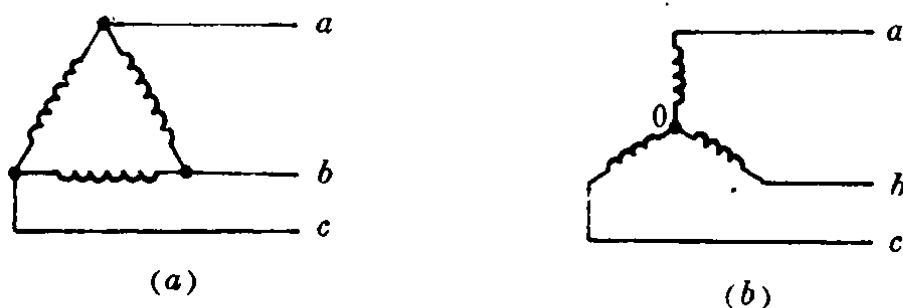


图 1-3

角接时，相线间的电压正是绕组两端的电压，因而“线电压”与“相电压”相等。相线中的电流是两个绕组中的电流汇合的产物，而两相之间的相位差为 $120^\circ$ ，因而线电流应为相电流的 $\sqrt{3}$ 倍。

星接时，相线与绕组处于串联状态，因而线电流应与相电流相等。相线间的电压是两个绕组上的电压叠加的结果，因此，线电压不可能与相电压相等。注意到两个相电压之间有着 $120^\circ$ 的位相差，则可知线电压是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。

电机铭牌上所标出的“额定电压”和“额定电流”是指线电压和线电流的额定值，但本书在推导公式时所用的电压和电流则是指相电压和相电流，请读者注意这一点。

#### 4. 极数与转速

定子绕组可以有许许多多不同的绕法。绕法不同，所得到的磁极的数目也不同。如果电机中只有一对磁极，则称其为二极电机；如果有两对磁极，则称其为四极电机；类推之，还有六极电机、八极电机等等。

电机的铭牌上一般都将磁极的数目标出，例如JO<sub>2</sub>-52-4型电机的末尾的数字“4”，表示该电机是四极电机；JO<sub>2</sub>-71-6型电机的末尾的数字“6”，表示该电机是六极电机。

磁极总是成对出现的，所以可用磁极的对数来表示极的多少，只要知道了交流电的周波(频率) $f$ 和磁极的对数 $p$ ，就可利用下式来计算同步转速 $n_T$ ：

$$n_T = \frac{60f}{p} \quad (\text{转/分}) \quad (1-1)$$

在通常情况下，转子的转速 $n_e$ 与同步转速 $n_T$ 的差异很有限。因此，一旦知道了 $n_T$ ，也就知道了 $n_e$ 的大致数值，两者的差异可用“转差率” $s$ 来表示，其定义为

$$s = \frac{n_T - n_e}{n_T} \quad (1-2)$$

由此可知

$$n_e = (1 - s)n_T \quad (1-3)$$

对于理想的异步机来说，空载时的 $s$ 等于零。异步机作为电动机使用时， $s$ 应大于零；作为发电机使用时， $s$ 应小于零。

#### 5. 异步机与原动机的匹配

异步机用于发电时，为了保证有合格的频率，并使设备发挥最大的潜力，必须使异步机的同步转速与原动机的转速处于匹配状态。

如果原动机的转速 $n_0$ 与式(1-3)中的 $n_e$ 恰巧相等,则原动机与异步机之间不必采用变速装置。如果 $n_0$ 与 $n_e$ 不相等,则应采用变速齿轮或皮带轮,使传动比等于 $\frac{n_0}{n_e}$ 。

如果原动机轴上的轮子直径为 $D_0$ ,异步机轴上的轮子直径为 $D$ ,两轮通过齿或皮带直接耦合,则在设计时应使 $D_0$ 和 $D$ 满足如下关系:

$$\frac{D}{D_0} = \eta \frac{n_0}{n_e} = \eta \frac{n_0}{(1-s)n_T} \quad (1-4)$$

或

$$\frac{D}{D_0} = \eta \frac{pn_0}{60f(1-s)} \quad (1-5)$$

这里的 $\eta$ 为传动效率。若为齿轮传动,则 $\eta$ 等于1;若为皮带轮传动,则 $\eta$ 约为0.94~0.98。皮带轮的传动效率低于1,是由于打滑而引起的。

在通常情况下,可取 $s = -0.05$ ,  $f = 50$ 赫,于是式(1-4)和(1-5)可改写为

$$\frac{D}{D_0} = \frac{\eta n_0}{1.05n_T} \quad (1-6)$$

和

$$\frac{D}{D_0} = \frac{\eta pn_0}{3150} \quad (1-7)$$

〔例〕 今有八极异步电机JO<sub>2</sub>-91-8一台,用于发电。原动机是一台转速为 $n_0 = 1460$ 转/分的柴油机。试问:应采用怎样的变速齿轮或皮带轮?

解: 八极异步电机的 $p = 4$ ,  $n_T = 750$ 转/分,将它们及 $n_0$ 的值代入(1-6)或(1-7)则得

$$\frac{D}{D_0} = 1.85 \eta$$

若用齿轮变速， $\eta = 1$ ，则有

$$\frac{D}{D_0} = \frac{1.85}{1}$$

也就是说，异步机齿轮与柴油机齿轮的齿数比为1.85 : 1。

若用皮带轮变速，取 $\eta = 0.96$ ，则有

$$\frac{D}{D_0} = \frac{1.78}{1}$$

也就是说，异步机皮带轮与柴油机皮带轮的直径之比为1.78:1。

## 第二节 发电的逻辑过程

异步机为什么能发电呢？其发电的逻辑过程是这样的：

### 1. 由剩磁通产生感应电动势

异步机的铁芯里通常总有一些剩磁存在，因而定子绕组必然包裹着一定数量的磁力线，其通量记作 $\Phi_0$ 。当转子被原动机拖动以后，剩磁的磁场就会旋转起来，同定子绕组相互作用，使定子绕组内产生感应电动势 $E_1$ 。根据法拉第电磁感应定律，这个感应电动势的相位必定比磁通的相位滞后 $90^\circ$ ，如图1-4所示。

### 2. 电压的建立

由于定子绕组内产生了感应电动势 $E_1$ ，使导体中的正、负电荷受到相反方向的力，分别向两极集结，产生了电场，建立起电压 $U_1$ 。由于电场力总是试图使正、负电荷相互中和，与感应电动势的作用相反，因而电压 $U_1$ 的位相必定与 $E_1$ 的位相相反，相差 $180^\circ$ 。由于 $E_1$ 比 $\Phi_0$ 滞后 $90^\circ$ ，而 $U_1$

与 $E_1$ 位相相反，所以 $U_1$ 应比 $\Phi_0$ 超前 $90^\circ$ ，如图1-5所示。

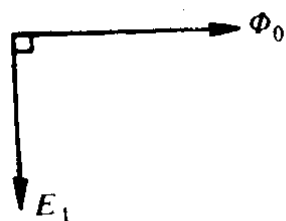


图 1-4

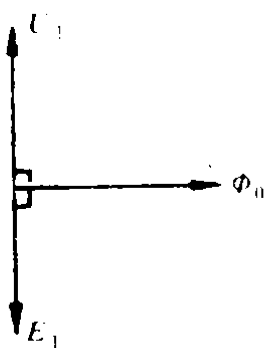


图 1-5

### 3. 电流的出现

如果定子绕组是处于开路状态，则电压 $U_1$ 不可能引起电流。如果外电路被接通，那么导体中的电荷就会在 $U_1$ 的驱使下形成为电流 $I_1$ 。该电流与电压之间的相位关系由电路的性质来决定。假如闭合回路的总阻抗是纯电感性的，则 $I_1$ 的相位应比 $U_1$ 落后 $90^\circ$ ，从而与 $\Phi_0$ 的位相相同，如图1-6所示。

### 4. 电流的激磁作用

电流 $I_1$ 不仅要由外电路中流过，同时也必定要流经定子绕组本身，从而在绕组内提供一个新的磁通 $\Phi_1$ 。根据电流磁效应的特点， $\Phi_1$ 总是正比于 $I_1$ ，因而两者的相位必定相同，如图1-7所示。

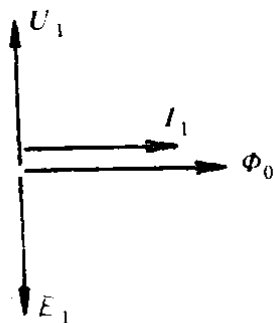


图 1-6

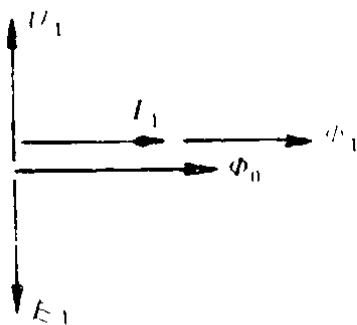


图 1-7

## 5. 磁通的螺旋式上升

值得指出的是：由于 $\Phi_1$ 与 $I_1$ 具有相同的相位，而 $I_1$ 与 $\Phi_0$ 也具有相同的相位，所以 $\Phi_1$ 与 $\Phi_0$ 也应当具有相同的相位。也就是说， $\Phi_1$ 与 $\Phi_0$ 叠加在一起时，并不是相互削弱，而是相互加强，使总磁场变强。

新的磁通 $\Phi_1$ 出现以后，它必定会像 $\Phi_0$ 一样，依次地引起感应电动势 $E_2$ 、电压 $U_2$ 、电流 $I_2$ 和磁通 $\Phi_2$ ； $\Phi_2$ 又会依次地引起 $E_3$ 、 $U_3$ 、 $I_3$ 和 $\Phi_3$ ； $\Phi_3$ 再引起 $E_4$ 、 $U_4$ 、 $I_4$ 和 $\Phi_4$ ……依次类推，不断往复，总磁通就会不断地上升，最后达到某个数值 $\Phi$ 而稳定下来，如图 1-8 所示。图中的 $\Phi$ 是代表 $\Phi_0$ 与 $\Phi_1$ 、 $\Phi_2$ 等等的总和，它比原有的剩磁 $\Phi_0$ 要大得多。

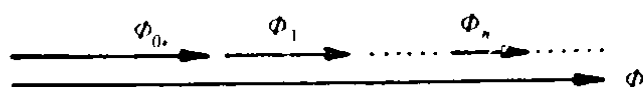


图 1-8

一旦有了足够强的磁场，相应地也就可以获得足够高的电动势，输出足够高的电压，达到发电的目的。

以上便是异步机发电的逻辑过程。

人们也许会提出这样的问题：磁通螺旋式上升的结果，是否有可能变为无限大呢？不会的。因为 $\Phi_1$ 是起源于 $\Phi_0$ ， $\Phi_2$ 是起源于 $\Phi_1$ ， $\Phi_3$ 是起源于 $\Phi_2$ ……，类推之， $\Phi_{n+1}$ 是起源于 $\Phi_n$ ，也就是说， $\Phi_0$ 、 $\Phi_1$ 、 $\Phi_2$ …… $\Phi_n$ ……依次地为因果关系。如果铁芯的导磁系数为常数，则“因”和“果”的比值也应为常数，即

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_0} = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{\Phi_3}{\Phi_2} = \dots = \frac{\Phi_{n+1}}{\Phi_n} = \dots = k \quad (1-8)$$

总磁通 $\Phi$ 应为以 $\Phi_0$ 为首项、以 $k$ 为公比的几何级数所有项之和：

$$\begin{aligned}\Phi &= \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n + \dots \\ &= \Phi_0 + \Phi_0 k + \Phi_0 k^2 + \dots + \Phi_0 k^n + \dots\end{aligned}\quad (1-9)$$

如果 $k$ 为小于1的量，则上述级数是收敛的，其值为

$$\Phi = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 - k^{n+1}}{1 - k} \Phi_0 = \frac{1}{1 - k} \Phi_0 \quad (1-10)$$

在通常情况下， $k$ 确实是小于1的，所以 $\Phi$ 不可能是无限大。

人们也许会认为上述理由不充分，因为式(1-10)只有当 $k$ 小于1时才是正确的，但 $k$ 有可能大于1。如果导磁系数为常数，那末定子绕组与 $\Phi_0$ 相互作用而得的感应电动势 $E_1$ 就应当与转速成正比，从而使 $\Phi_1$ 也与转速成正比，使 $\Phi_1$ 与 $\Phi_0$ 的比值 $k$ 也与转速成正比。因此，只要提高转速，就总有可能使 $k$ 大于1，从而使式(1-9)中的 $\Phi$ 成为无限大。但问题是在于：实际铁磁材料的导磁系数只有在磁场不太强时才可被视为常数，当磁场很强时，材料中的分子磁矩或磁畴已经排列得很整齐，达到饱和状态， $k$ 就会下降到1以下。因此，在任何情况下， $\Phi$ 都不可能变为无限大。

### 第三节 发电的必要条件

在上述发电的逻辑过程中，有一条是假定的，即假定“闭合回路的总阻抗是纯电感性的”。由于有了这条假定，才出现了“磁通螺旋式上升”的局面。如果闭合回路的总阻抗是纯电容性的，那么 $I_1$ 的相位就不可能是比 $U_1$ 落后 $90^\circ$ ，而应当是超前 $90^\circ$ ，从而使 $\Phi_1$ 的相位与 $\Phi_0$ 相反。在这种情

况下， $\Phi_1$ 与 $\Phi_0$ 叠加时就不可能是相互加强，而是相互削弱，其结果是：磁场不仅没有越来越强，而且会使原有的剩磁逐渐地消失掉。由此可见，电容性的电路是不可能用于发电的；全电路呈电感性，是异步机发电的必要条件（这里所说的“电感性”，并不是专指“纯电感性”，在有负载时，总阻抗中不仅包含着电抗，还应当包含着电阻，只要其中的电抗是电感性的， $\Phi_1$ 与 $\Phi_0$ 的相位差就必定小于 $90^\circ$ ，两者叠加时就总能实现相互加强）。

#### 第四节 两种激磁方式

异步机发电时，有两种激磁方式，一是“自激发电”，二是“他激发电”。前者是利用自身所发的电来激磁，后者是利用其他电源的电来激磁。

##### 1. 电容自激发电

利用电容激磁是异步机发电用的最普遍的一种方法，其基本电路如图 1-9 所示。图中的  $F$  为异步机， $C$  为激磁电容器。由于有了电容器，全电路就会呈电感性（而不是电容性），使异步机具备发电的必要条件。关于这一点，下一章中还要详细讨论。

发电时，异步机除了向外输送电力而外，还同电容器  $C$  组成闭合回路，周期性地向电容器充电。同时，电容器也周期性地通过异步机的定子绕组来放电。正是这种交替进行的充电和放电过程，起着激磁作用。

##### 2. 电网电源激磁发电

当异步机定子的三相绕组接在电网电源上时，它就会获得一种以同步转速  $n_T$  转动的旋转磁场，而其转子的转动情



况则有以下三种：

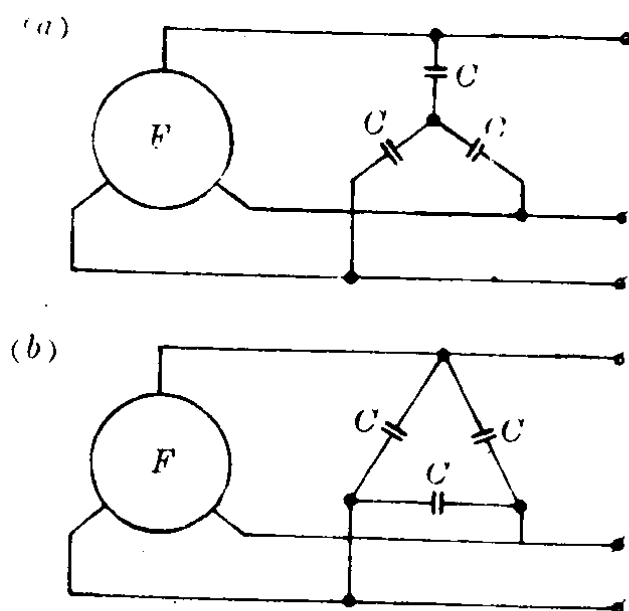


图 1-9

(1) 如果转子的轴上接有某种机械负载，需要向机械负载输送能量，则转子的转速 $n_e$ 必定小于同步转速 $n_T$ ，转差率 $S$ 为正数。这时的异步机为电动机。

(2) 如果转子上没有任何负载，并且忽略机械零件间的摩擦作用，则 $n_e$ 将会与 $n_T$ 相等，转差率 $S$ 为零。

(3) 如果转子的轴与某种原动机相连接，并且原动机能使 $n_e$ 大于 $n_T$ ，使转差率 $S$ 为负数，那么电网所提供的磁力矩的方向就必定与转速方向相反，而机械力矩的方向则与转速方向相同。磁力矩是作负功，机械力矩作正功（转化为电能）。这时的异步机就成为发电机了。

电网电源激磁发电就是利用上面的第三种情形来进行的。在这里，电网电源所起的作用是向异步机提供无功电流（激磁电流），使发电设备中可以省去笨重的电容器，这是这种发电方式的一个重要特点。