

同步发电机运行 与维修

吴纪苏 主编

机械工业出版社



内 容 提 要

本书简要地叙述了同步发电机的工作原理、结构和各种励磁方式,并着重讨论了小型同步发电机的运行、使用、维修和常见故障的分析及排除方法;此外,还简要地介绍了发电机配电控制屏,发电机与水轮机、柴油机配套使用,以及提高发电机运行可靠性的一些措施及维修方法。

本书可供作农村小型水电站、各种移动电站以及中小型厂矿自备电站、船舶电站的运行和维修电工培训及自习用书,也可供有关技术人员参考。

同步发电机运行与维修

吴纪苏 刘飞轮 林大海 编著
陆永静 王裕中 金敏然

*

责任编辑 董保申
封面设计 田淑文

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32 · 印张 8¹/₄ · 字数 180 千字
1987年4月重庆第一版 · 1987年4月重庆第一次印刷
印数 0.001—7,200 · 定价 1.75 元

*

统一书号: 15033·6519

前 言

我国有丰富的水力资源，是发展小水电站的一大优势，有着广阔的前景。

目前，农村已建立了一大批小型水电站；不少厂矿、部队、机关、学校、商店、医院及剧院等也建立有自备电站，这些电站大多采用小型同步发电机作为发电设备。从事此项工作的广大电工迫切需要掌握其工作原理及其运行维护的技术知识，以保证发电设备的安全运行，充分地发挥其效用。为了满足这方面的需要，我们特编写此书，供培训小型发电站运行和维修电工教学参考和电工自学。

本书总结了小型电站维修小型同步发电机的经验，吸取了办小型电站使用和维修技术人员培训班的教学经验，在内容的取材上从维修需要出发，尽量做到理论与实践相结合，在问题的阐述上，力求深入浅出、通俗易懂、适用性强。

本书在编写过程中，得到江西第二电机厂和江西省水电厅农电处的支持与帮助，并提出了不少宝贵意见，谨此表示深切的谢意！

参加本书编写工作的有吴纪苏、刘飞轮、林大海、陆永静、王裕中、金敏然同志，由吴纪苏同志主编，插图工作主要由刘飞轮同志完成的；由张碧英、梅崑、潘瑞征同志进行了审稿。

由于编者水平所限，书中错误和缺点在所难免，请读者批评指正。

编 者

一九八四年二月

目 录

前 言

第一章 同步发电机的工作原理和结构.....	1
第一节 同步发电机的工作原理	1
第二节 同步发电机的构造	10
第二章 同步发电机的绕组及感应电势	17
第一节 同步发电机的磁路	17
第二节 同步发电机的电枢绕组	20
第三节 同步发电机电枢绕组的感应电势	29
第三章 同步发电机在对称负载时的工作特性.....	39
第一节 三相绕组的磁势	39
第二节 电枢反应	42
第三节 基本电磁方程式及相量图	47
第四节 同步发电机的工作特性	54
第四章 同步发电机的励磁系统	64
第一节 带直流励磁机的励磁方式	64
第二节 无刷励磁方式	69
第三节 三次谐波励磁方式	72
第四节 电抗移相式相位复式励磁方式	79
第五节 双绕组电抗分流自励恒压方式	86
第六节 逆序补偿励磁方式	88
第五章 谐波励磁自励恒压发电机的励磁系统.....	90
第一节 谐波励磁系统简介	90
第二节 谐波励磁系统中半导体元件	91
第三节 T2S 系列谐波励磁主电路	102

第四节	谐波励磁发电机电压调节器	103
第五节	TST电压调节器工作原理	119
第六章	同步发电机的并联运行	126
第一节	功率、转矩与功角特性	126
第二节	同步发电机的V形特性	131
第三节	功率分配的调整	133
第四节	投入电网并联运行的方法	138
第五节	双绕组电抗分流发电机并联运行	141
第六节	谐波励磁发电机并联运行	145
第七节	小型同步发电机作同步补偿机运行	157
第七章	同步发电机的配电屏和继电保护	159
第一节	同步发电机的电气测量仪表	159
第二节	小型同步发电机的配电屏	167
第三节	同步发电机的继电保护	168
第八章	同步发电机的试验	179
第一节	基本物理量的测量	179
第二节	同步发电机基本特性的测定	183
第三节	小型同步发电机维修后的试验	188
第九章	同步发电机的常见故障及处理	190
第一节	同步发电机常见故障及处理方法	190
第二节	发电机温度升高	194
第三节	发电机定子绕组损坏	196
第四节	发电机转子励磁绕组接地	201
第五节	发电机的非同期并列	204
第六节	发电机失磁	205
第七节	发电机升不起电压	206
第八节	电机绕组的修理方法	207
第九节	带励磁机的发电机改为谐波励磁发电机的方法	212
第十节	谐波励磁发电机励磁调节系统常见故障的分析	

与排除	217
第十章 小型同步发电机的配套与使用	226
第一节 小型水轮发电机组	226
第二节 柴油发电机组	233
第三节 船用发电机组	249
第四节 双频发电机组	250

第一章 同步发电机的工作原理和结构

第一节 同步发电机的工作原理

火力发电厂的汽轮机带动发电机旋转，水电站的水轮机带动发电机转动，船舶上的柴油机拖动发电机工作，这其中，汽轮机、水轮机、柴油机都是发电机的原动机，它们从轴上输送给发电机旋转的机械能，发电机通过它内部的电磁作用将旋转的机械能转换成电能。同步发电机就是一个将机械能转换成交流电能的电力机械。本节内容就是讨论同步发电机的工作情况以及有关交流电的一般概念。

一、交流发电机

图 1-1 是一个同步发电机工作原理的示意图，它的转子是一对磁极，定子上安放了发电用的绕组，通常它是三相的，现画出一个线圈代表一相示意。当原动机带动转子磁极旋转以后，磁场和线圈产生了相对运动，线圈的导体切割了磁力线，因而在线圈中产生了感应电动势（简称电势），也就是说发了电。将这个电势接上用电设备，即可供电工作。这个电势的方向由右手定则决定，电势的大小由电势公式得

$$e = Blv$$

式中 B ——磁通密度；

l ——导体的有效长度；

v ——相对运动时的线速度。

这个关系式表明：若磁极的磁场越强，线圈越长，转子的旋转速度越快，那么产生电势的数值也越大。

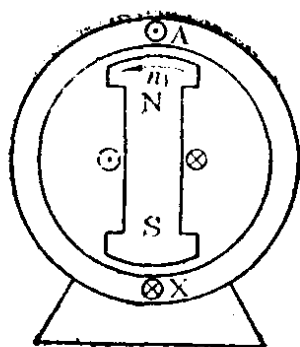


图 1-1 发电机模型

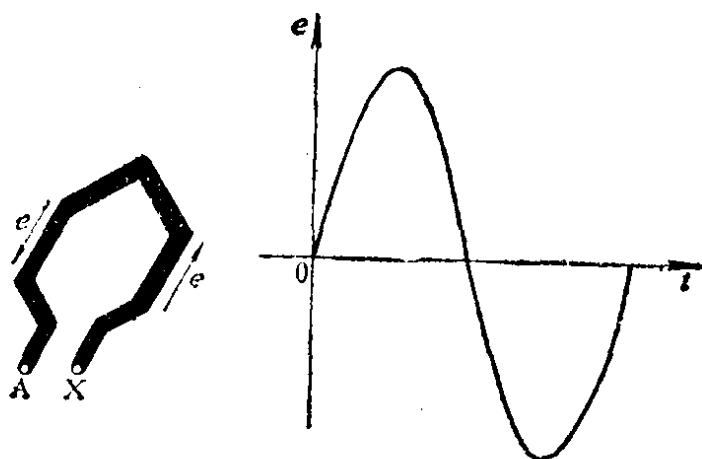


图 1-2 交流电势波形

这是一个随时间交变的电势，因为磁极在旋转，线圈边导体所处的磁场位置不断地变换，从 N 极变到 S 极时电势就跟着改变大小和方向，所以说是一个交流电势。

电势每秒钟内变化的次数称为频率，用 f 表示。如图 1-1 的一对磁极的电机（简称一对极），转子转一圈，导体下的极性变换一次，电势也就变化一次，所产生的电势波形如图 1-2 所示。所以这个电机的转子每秒钟旋转的转数，也就是线圈电势随时间交变的频率。转子每分钟的转数称为转速，用 n_s 表示，换算成每秒速度时应除以 60，故一对极电机的感应电势频率为

$$f = \frac{n_s}{60} (1/\text{秒})$$

转子磁极有四个、即两对极时，转子转一圈，极性变换两次，于是电势频率将是相应一对极时的两倍；同理，三对极的频率是一对极时的三倍。故对一个 p 对极的电机来说，它的频率是一对极的 p 倍。频率的一般表示式应写成

$$f = \frac{pn_s}{60} \text{ (1/秒)} \tag{1-1}$$

我国电力工程的标准频率为每秒50周，即50赫。故同步发电机的极对数 p 和转速 n_s 有严格的规定，由式 (1-1) 可推出

$$pn_s = 60f = 60 \times 50 = 3000 \tag{1-2}$$

因而3000 转的发电机必须是一对极的，600 转的发电机就应该是 5 对极的。不同极对数和转速之间的关系见表1-1。

表1-1 转速与极对数的关系

极对数 p	1	2	3	4	5	6	8
转 速 n_s	3000	1500	1000	750	600	500	375

二、交流电的有效值、瞬时值、最大值和平均值

交流电势（交流电流）在某一瞬间的数值称为瞬时值。在交变的一周中，正向或负向最大的瞬时数值称为最大值，也称幅值。交流的正半周或负半周内各瞬时值的平均数值，称为平均值。在实际应用上，交流电的大小常用有效值来表示。

交流电的有效值，就是假定与直流电有相同热效应的交流电数值，即在两个相等的电阻内，分别通以交流电和直流电，如果它们产生的热量相等，则所通交流电的数值与直流电的数值等效，就可以此直流电数值视为交流电的有效值。通常所说的交流电压（如380伏、220 伏）及交流电流（如 5 安、10安），其数值都是指的有效值。

交流有效值亦等于交流电一周中各瞬时值平方的平均值的平方根，所以也称为均方根值。

正弦波交流电的有效值为最大值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 或 0.707 倍，最

大值为有效值的 $\sqrt{2}$ 或1.414倍。其关系如下

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m \\ I_m &= \sqrt{2} I = 1.414 I \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707 E_m \\ E_m &= \sqrt{2} E = 1.414 E \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式中 I ——交流电流有效值；

I_m ——交流电流最大值；

E ——交流电压的有效值；

E_m ——交流电压的最大值。

三、交流电的电角度和相位差

交流发电机的转子旋转经过一对磁极就可以产生交变电动势的一个周期的变化。因此，在两极发电机中，转子必须旋转一圈、即空间角为 $360^\circ (2\pi)$ 才能完成一周；在四极发电机中，旋转半圈即空间角为 $180^\circ (1\pi)$ 就能完成一周。不论其实际空间角度如何，规定交流正弦波变化一周的角度为 360° 电角度(2π 弧度)。因为变化一周内，正负波各占一半，相当于NS一对磁极，所以，一对磁极所占的电角度为 360° ；四极发电机为两对极，故在空间为 360° 的一周内有两个 360° 的电角度，即电角度为 720° ，余类推。

在交流电路中，除了电阻外还包含有电抗（电容和电感），会使电路中的电压和电流之间产生相位差（用 φ 表示），使电流的变化不与电压的变化一致，总是滞后或者越前一定的电角度。

四、正弦波的相量图示法

交变电动势（或交变电流）除了用前面提到的正弦曲线

表示外，也可以用旋转相量来表示（如图1-3）。相量的长度表示正弦波电压或电流的最大值，旋转相量与水平线的夹角表示相角，并规定以反时针旋转方向为相角的正方向，顺时针方向为相角的负方向。大于 180° 的相角可改用较小的负值相角来代替，例如 200° 的相角可用 -160° 相角代替。旋转相量在各个不同位置上对于垂直线上的投影，表示正弦波相应位置的瞬时值，向量旋转的速度称为正弦波的角速度，以 ω 表示。

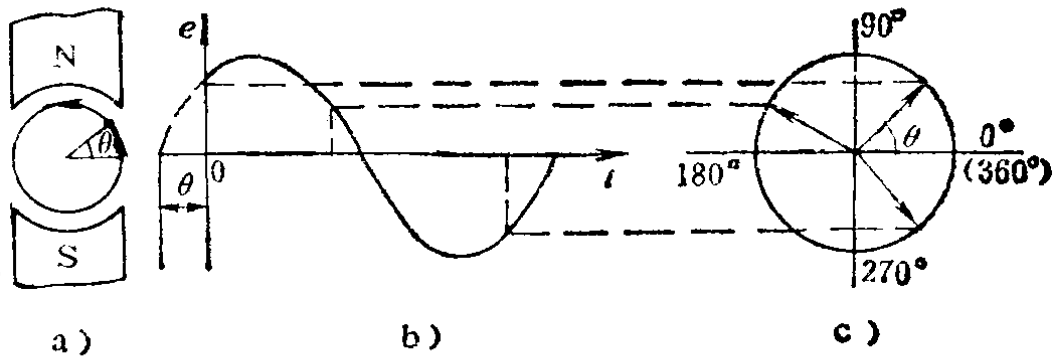


图 1-3 正弦波的旋转相量图

正弦波电压和电流是按照正弦曲线规律连续起伏的波，实际上并没有确定的起点或终点。但为了说明正弦波变动的情况，我们选定一个起点，如图1-3b所示0位置，这个起点与正弦波零值开始上升时之间的电角度 θ 就称为该正弦波的初相角或起始相位。

旋转相量相加图示法则是将相量图上分别对相量OA（代表 e_a ）和相量OB（代表 e_b ）作一个平行四边形，平行四边形的斜边OC就是相量OA和OB的合成相量。相量OA和OB的长度表示交变电动势 e_a 和 e_b 的最大值，则合成相量OC表示合成电动势 e_c 的最大值，如图1-4所示。

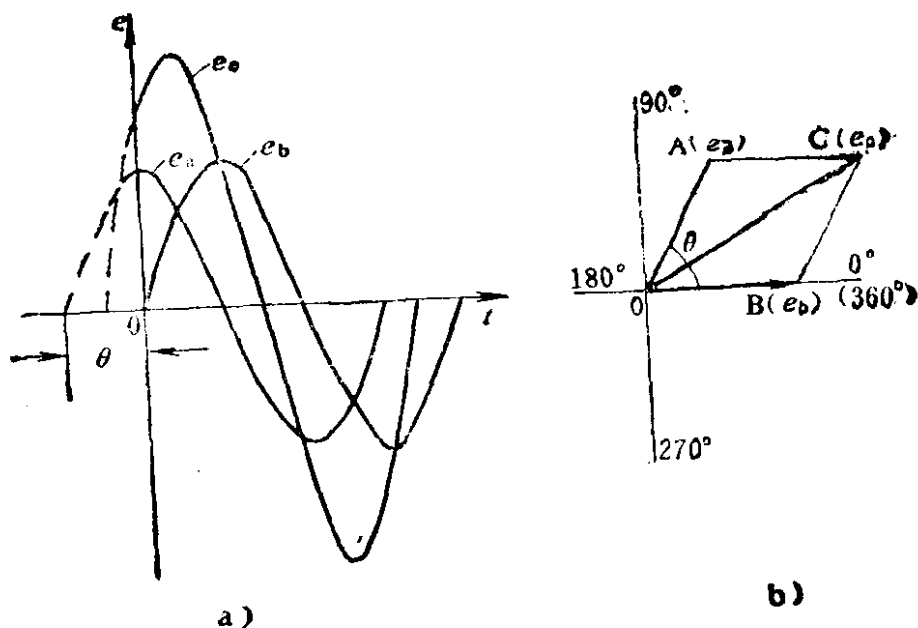


图 1-4 旋转相量合成示意图

有时在工程应用中，相量 OA 和 OB 也可以表示交变电动势的有效值，那末合成相量 OC 表示合成电动势的有效值，但是用有效值表示的相量无法画出相应的正弦曲线。

五、三相交流电的产生

在图1-5中，重复了图1-1的模型，但是增加了一个线圈B-Y，这个线圈的位置和原有线圈错开 120° 角的位置，当转子旋转时，对于每一个线圈单独地来说，都产生一个交流电势，但这两个交流电势之间有一个相位差，如图示的瞬间，磁极N的中心正对着线圈边A，A切割到最大的磁力线数，电势达到最大值。线圈B-Y此时未处于磁极中心位置，电势不是最大；当磁极再转过 120° ，N极到达B的线圈边位置时，B线圈的电势才能达到最大。由此可知，B-Y的电势最

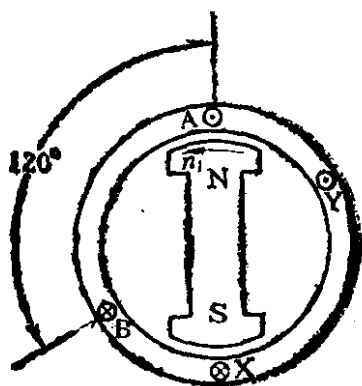


图 1-5 电机模型

大值出现的时间要比 A-X 线圈晚一些，即相差 120° 的时间。这一现象就称为 B-Y 的电势“落后 120° ”，即相位差为 120° 。很明显，如果再在与 B-Y 相距 120° 的位置上布置一个线圈 C-Z，这时 C-Z 与 A-X 也相差 120° ，即三个线圈互差 120° ，那么就可使得 C-Z 的电势落后 B-Y 以 120° 。这样就可以得到一组相位互差 120° 的三相电势，即产生三相交流电。所以，在两极电机里，只要把三个线圈沿定子圆周按互差 120° 分布排列，就可以产生三相交流电，见图 1-6 所示，此即工矿农村企业所需的动力电源。

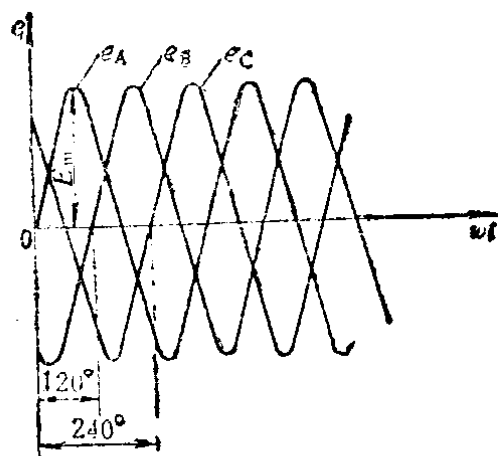


图 1-6 一组三相电势波形

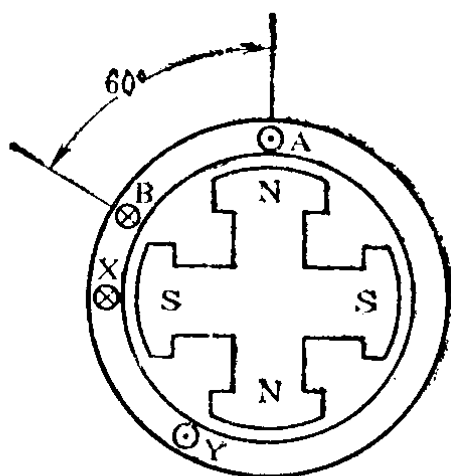


图 1-7 两对极电机模型

$p=2$ 的四极电机模型如图 1-7 所示，在这个两对极的电机里，线圈的安排在几何空间位置相差 60° ，但从电角度的概念来认识，仍然是互差 120° 电角度。

由于引用了电角度，从而使我们对于任何极对数的电机都可以简化成一对极的电机来讨论，所以结论应该是：要获得三相电势，就必须在电机圆周上布置一套互相差 120° 电角度的三个绕组。

在图 1-1 中，磁极转一圈，即转过 2π 弧度时，线圈中的

电势即交变一次，所以每秒钟内转过的弧度数也可以用来表示交变次数，这就是角频率 ω 。角频率 ω 和频率 f 之间的差值就是 2π ，故在—对极的电机中两者之间的关系为

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{弧度/秒}) \quad (1-5)$$

若以A、B、C表示相序，以 e_A 、 e_B 、 e_C 表示三相电势，以数学式表示三个电势为

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

式中 E_m ——正弦波电势的振幅；

ω ——电势的角频率。

六、三相交流电的功率、功率因数

在交流电路中，交流电的功率一般常用平均功率 P 来表示。平均功率就是指在一个周期内瞬时功率的平均值。

在纯电阻的电路中，平均功率等于电压与电流有效值的乘积，即

$$P = UI = IIR = I^2 R = \frac{UU}{R} = \frac{U^2}{R} \quad (1-7)$$

在具有电抗的交流电路中，电压与电流有效值的乘积，称为交流电的视在功率或称总功率，用字母 S 来表示，即

$$S = UI \quad (\text{伏安或千伏安}) \quad (1-8)$$

电流在电阻中消耗的功率称为交流电的有功功率，有功功率 P 等于电阻电压降 U_R 与电流 I 的乘积，即

$$P = U_R I \quad (\text{瓦或千瓦}) \quad (1-9)$$

电流与电抗电压降 U_L 的乘积，称为交流电的无功功率，用字母 Q 表示，即

$$Q = U_L I \quad (\text{乏或千乏}) \quad (1-10)$$

视在功率、有功功率、无功功率之间的关系式为

$$\left. \begin{aligned} S^2 &= Q^2 + P^2 \\ S &= \sqrt{Q^2 + P^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

在正弦交流电路中，有功功率与视在功率的比值或负载电阻 R 与总阻抗 Z 的比值为—因数，这一因数称为功率因数，功率因数也等于交流电路中电流和电压相位差 φ 的余弦，即

$$\left. \begin{aligned} \cos\varphi &= \frac{P}{S} = \frac{U_R}{U} = \frac{R}{Z} \\ S &= UI \\ P &= UI\cos\varphi \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

功率因数的最大值为1，这时的交流电路为纯电阻性电路，线路中电压和电流的相位一致，即 $\varphi=0^\circ$ 。

功率因数的最小值为零，这时的交流电路为纯感性电路(或纯电容电路)，电压和电流的相位差为 90° (或 -90°)。

以上介绍的单相电路的情况，三相电路的总功率 P (有功功率)等于单相电路的有功功率的三倍，即

$$P = 3U_{\text{xn}}I_{\text{xn}}\cos\varphi \quad (1-13)$$

式中 U_{xn} ——相电压的有效值；

I_{xn} ——相电流的有效值；

φ ——相电压和相电流的相位差。

在电路中，测量线电压 U_{x} 和线电流 I_{x} 较为方便，所以通常用发电机端的线电压 U_{x} 和供给负载的线电流 I_{x} 来计算功率，在三相电路中通常所说的电压和电流都是指线电压和线电流。

当负载作星形连接时 $I_{\text{x}}=I_{\text{xn}}$ ， $U_{\text{x}}=\sqrt{3}U_{\text{xn}}$ ，则三相电路的有功功率为

$$P = 3 \times \frac{1}{\sqrt{3}} U_x I_x \cos \varphi = \sqrt{3} U_x I_x \cos \varphi \quad (1-14)$$

视在功率为

$$S = \sqrt{3} U_x I_x \quad (1-15)$$

当负载作三角形连接时、 $I_x = \sqrt{3} I_{xn}$, $U_x = U_{xn}$, 则三相电路的有功功率为

$$P = 3 U_x \times \frac{1}{\sqrt{3}} I_x \cos \varphi = \sqrt{3} U_x I_x \cos \varphi \quad (1-16)$$

视在功率为

$$S = \sqrt{3} U_x I_x \quad (1-17)$$

因此, 在三相电路中, 无论是星形或者三角形接法, 计算总功率的公式都是相同的。在交流发电机中一般很少采用三角形接法, 大多采用星形接法。

第二节 同步发电机的构造

从结构上讲, 发电机是由定子和转子组成的。但是在发电机中, 产生磁场的磁极不一定总是固定的, 而输出感应电流的绕组, 也同样不一定是旋转的。无论是何种结构形式, 发电机都是由: 建立磁场的磁极、产生感应交变电动势的电枢和支持基础的机壳以及传导电流的附属装置—滑环和电刷等组成的。

一、交流发电机结构基本型式

交流发电机的基本型式分为旋转电枢式和旋转磁场式两种。这两种型式的发电机虽然在结构上有些不同, 但是都符合由磁场与导体相对运动而使导线感应产生电动势的作用原

理。

旋转电枢式交流发电机，电枢是转动的，磁极是固定的。电枢绕组绕在转子上，转子由原动机带动旋转后，电枢绕组切割磁极磁场而感应产生交变电动势，此交变电动势通过滑环和电刷引出与外电路连接。

因为采用电刷和滑环来引出大电流是比较困难的，而且容易产生火花和磨损，所以转枢式结构只适用于小容量、低电压的交流发电机。一般交流发电机多数采用旋转磁场式结构。

旋转磁场式交流发电机，磁极是旋转的，电枢是固定的。电枢绕组嵌置在固定的槽子里，分布在定子的整个圆周上，因此有较多的空间位置来安置电枢绕组的线圈和绝缘，可以不经过可动的滑环和电刷而直接送往外电路，所以绝缘能力和机械强度较好，而且安全可靠。本书将着重讨论此种结构形式的电机。

磁极上绕有励磁绕组，发电机所需励磁电流通过电刷和转轴上的滑环引入励磁绕组，一般励磁电压较低（几十伏），励磁电流较小（例如40千瓦的发电机，励磁电流为十几安培），与转枢式结构相比，励磁电流通过滑环和电刷时所产生的火花要小得多。

磁极上励磁绕组的电流，可以由直流发电机供给（供给励磁用的直流发电机称为励磁机）；也可以由发电机端电压或辅助绕组内引出。供给励磁绕组直流电的装置在第四章中介绍。

二、小型同步发电机的构造（以T2S系列电机为例）

三相交流同步发电机由定子、转子、风扇、前端盖、后端盖、出线盒等组成，如图1-8所示。