

中小型同步发电机使用与维修

电机修理技术丛书



金续曾 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

电机修理技术丛书

中小型同步发电机使用与维修

金绶曾 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn



本书较全面地介绍了三相和单相同步发电机的原理、结构、类型、定转子绕组和励磁系统，以及同步发电机的使用、维护、保养和常见故障的处理等。可供同步发电机组的值班、维护和修理人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

中小型同步发电机使用与维修/金续曾主编. —北京:
中国电力出版社, 2003

(电机修理技术丛书)

ISBN 7-5083-1004-7

I. 中… II. 金… III. ①同步发电机—使用②同步
发电机—维修 IV. TM341

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 048998 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2003 年 9 月第一版 2003 年 9 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 6.5 印张 170 千字

印数 0001—3000 册 定价 12.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)



中小型同步发电机由于具有结构简单、投资较少、安装快捷、操作简便和使用灵活等一系列优点，因而它在工矿自用电厂、农村小型水电站、城市高楼，以及地质、钻探、通信工程等部门，得到极为广泛的应用。因此，对中小型同步发电机组的正确使用、维护、保养和及时的维修，是确保同步发电机组正常运行和延长其使用寿命的首要条件。

本书为《电机修理技术丛书》之一，书中较全面地介绍了三相和单相同步发电机的原理、结构、类型、定转子绕组和励磁系统，以及同步发电机的使用、维护、保养和常见故障的处理等内容。叙述力求通俗易懂、理论联系实际。

附录中还附有常用三相、单相同步发电机的电气性能、外形和安装尺寸以及绕组技术数据和部分绕组接线图，供读者查阅参考。

全书由金续曾主编，并由何文辉、肖勇、何泳芳、金旻、解云祥参予合作完成。由于编者水平有限，书中如有错误和不当之处，请读者批评指正。

作 者

2003 年 4 月



前言

第 1 章	同步发电机的原理、结构与类型	1
第 1 节	同步发电机的工作原理	1
第 2 节	同步发电机的基本型式	10
第 3 节	同步发电机的基本结构	13
第 4 节	同步发电机的用途、型号及额定数据	18
第 2 章	同步发电机绕组及其连接	24
第 1 节	同步发电机绕组的分类	24
第 2 节	同步发电机绕组的基本参数及常用名词术语	27
第 3 节	绕组的构成及图示法	33
第 4 节	同步发电机绕组的类型	41
第 5 节	同步发电机定子绕组的连接	49
第 6 节	同步发电机转子绕组的连接	66
第 3 章	同步发电机的励磁系统	69
第 1 节	同步发电机的励磁方式	69
第 2 节	直流励磁机励磁系统	70
第 3 节	三相同步发电机的励磁系统	75
第 4 节	单相同步发电机的励磁系统	91
第 5 节	同步发电机自动电压调节装置	99
第 6 节	同步发电机常用励磁系统	106
第 4 章	同步发电机的使用与维修	113
第 1 节	同步发电机的配电屏	113

第2节	同步发电机继电保护	123
第3节	同步发电机使用的一般规则	131
第4节	同步发电机的维护	148
第5章	同步发电机常见故障的处理	157
第1节	同步发电机运行时不发电	157
第2节	同步发电机接入负载后熔断器熔断或自动 空气开关跳闸	159
第3节	同步发电机端电压过高	159
第4节	同步发电机端电压太低	160
第5节	同步发电机三相电压不平衡	161
第6节	同步发电机端电压起伏不稳定	161
第7节	同步发电机温升过高或内部冒烟	162
第8节	励磁电压或励磁电流不正常	163
第9节	电刷冒火花	165
第10节	同步发电机运行时噪声和振动异常	166
第11节	同步发电机轴承温升过高	167
第12节	同步发电机绝缘击穿	168
第13节	同步发电机定子绕组故障的检修	168
第14节	同步发电机转子绕组故障的检修	177
附录1	常用同步发电机技术数据	180
附录2	三相同步发电机定子绕组几种常用接线图	196



同步发电机的原理、结构与类型

中小型同步发电机是一种感应电动势的频率与转速之比为常数、将机械能转换成电能的交流电机。根据相数的不同，它分为单相同步发电机和三相同步发电机，按其磁极与电枢相对位置的不同又有旋转磁场式和旋转电枢式两种型式。

第1节 同步发电机的工作原理

一、电磁感应与发电机右手定则

从电工学中可知，当导体与磁场间有相对运动，而使两者相互切割时，就会在该导体内产生感应电动势，这种现象称为电磁感应。如果该导体是闭合的，在感应电动势的作用下，导体内就将产生电流，这个电流称为感应电流。如图 1-1 所示。将一根导线放在两个磁极的均匀磁场内，并在导线的两端接上一只电压表。当导线在垂直于磁力线方向以一定速度移动时，电压表的指针就会发生偏转。这就说明该导线与磁场发生相对运动和相互切割后，在其内部已产生出感应电动势和感应电流。

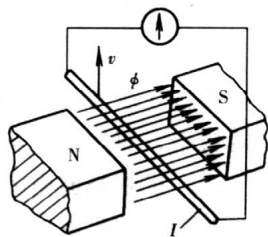


图 1-1 电磁感应现象示意图

导线在磁场中产生感应电动势的方

向可以用发电机右手定则来确定。如图 1-2 所示将右手平伸，掌心迎着磁极 N，并使磁力线垂直穿过手掌，拇指和其余四指伸直。这时，拇指所指的方向为导线的运动方向，其余四指的指向就是感应电动势方向。从上述试验中还可知，导线在均匀磁场内沿着与磁力线垂直的方向运动时，它所产生感应电动势的大小，与导线在磁场中的有效长度 l 、磁场的磁通密度 B 、导线在磁场

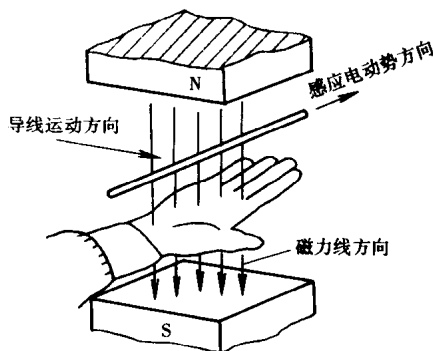


图 1-2 发电机右手定则

中的运动速度 v 成正比，即

$$e = Blv$$

式中 e ——感应电动势 (V)；

B ——磁通密度 (T)；

l ——导线有效长度；

v ——导线垂直于磁力线方向上运动的速度 (m/s)。

如果导线运动方向与磁力线方向的夹角 α 为任意角度时，则

$$e = Blv \sin \alpha$$

若将导线与外负载接成闭合回路，导线中就会产生电流并输出功率，而发电机就是根据这一原理来制造的。

二、正弦交流电的产生

在现代交流电被广泛应用于工业、农业、交通运输、矿山开采、信息通信等各个方面。人们的日常生活，如电风扇、空调器、电冰箱等诸多家用电器同样离不开交流电。因此，交流电在



生产、生活中占有极重要的地位。平时所用的交流电都是按正弦规律变化的正弦交流电。

正弦交流电是一种大小和方向随时间作周期性变化的电流。

1. 正弦交流电的产生

如图 1-3 所示为一根直导线在两极均匀磁场内作等速旋转时，它所产生的交变电动势。从以上可知，旋转导线中感应电动势的大小，取决于磁场的磁通密度、导线在磁场中的有效长度、导线切割磁力线的速度和角度。而感应电动势的方向则决定于导线切割磁力线的方向。因此，当长度不变的导线在均匀磁场内按一定方向作等速旋转时，它所产生的感应电动势数值将只与导线切割磁力线时的角度有关。

在图 1-3 中可见，当导线处于位置 1 时，由于导线的转动方向与磁力线平行，所以并未切割磁力线，也就不产生感应电动势；当导线转动至位置 2 时，导线与磁力线间的夹角，角度很小，所以产生的感应电动势也就很小；导线处于位置 3 时，与磁力线的夹角有所增大，所以它产生的感应电动势也相应增大；当导线转动到位置 4 时，导线与磁力线相垂直，这时导线切割磁力线的角度为最大，正好处于磁极的中央位置，因而所产生的感应电动势也为最大。经过位置 4 以后，导线与磁力线的夹角又逐渐减少，它所产生的感应电动势也就渐次减小。当转动到位置 7 时，导线的感应电动势减到零。

导线在经过位置 7 后，就进入磁场的另一个磁极下面。这时，由于导线切割磁力线的方向与前半转时的方向相反，所以它产生的感应电动势方向也随之相反。当导线相继转动至位置 8 和

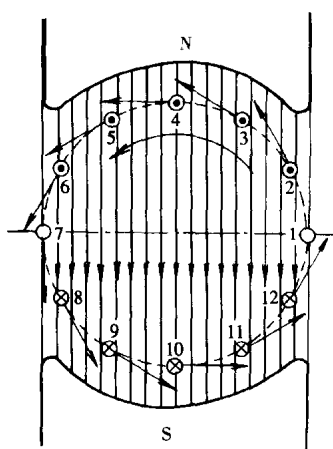


图 1-3 旋转导线
所产生的交变电动势



9 时，随着导线切割反方向磁力线角度的变化又逐渐使感应电动势增大；在导线处于位置 10 时，将达到反方向感应电动势的最大值；随着导线切割磁力线角度的相继减小，它所产生的感应电动势也随之逐渐减小；当导线转动至起点位置 1 时，感应电动势就又回落到零。若导线继续旋转，则该导线内的感应电动势数值就将重复以上的变化。

如果将导线在圆周上旋转的各点位置展开。用一根直线来表示导线在圆周上移动的位置，而在垂直的方向按比例画出导线在这些位置上所产生的感应电动势，并规定一个方向的感应电动势为正，相反方向的感应电动势则为负。这样，就可以依照这些感应电动势的大小绘出一条按正弦规律变化的曲线，即如图 1-4 所示。这条波动起伏的曲线称为正弦曲线。而按这种正弦规律变化的交流电源，称为正弦交流电。

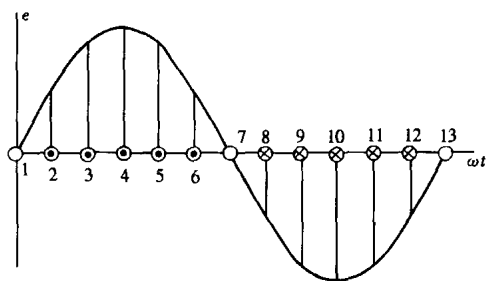


图 1-4 交流电的正弦曲线

2. 交流电的周期和频率

交变电压或电流完成正负变化一个循环所需要的时间，称为周期并用符号 T 表示。在单位时间每秒钟内变化的周期数即为频率，以符号 f 表示。频率与周期互为倒数的关系。即

$$f = \frac{1}{T} (\text{Hz}) \text{ 或 } T = \frac{1}{f} (\text{s})$$

周期的单位为 s，频率的单位是 Hz。有时也用交流电符号“~”来表示频率的每秒周数。例如：将平时所用供电频率每秒 50 周的交流电简写为 $f = 50\text{Hz}$ 。



3. 交流电的瞬时值和最大值

由于交流电压或电流的大小和方向总是随时间而不断变化的，因而它在每一瞬间均具有不同的数值，这个不同的值称为瞬时值，并规定用小写字母来表示。一般用 i 表示电流的瞬时值； v 表示电压的瞬时值；而用 e 表示电动势的瞬时值等。

电流、电压或电动势在一周期内的最大瞬时值，称为最大值并规定用大写字母表示，同时还应在字母的右下角标以 m 字样。如用 I_m 表示电流最大值； U_m 表示电压最大值，和用 E_m 表示电动势最大值等。

4. 交流电的相位和相位差

由以上所述可知，交变电动势或交变电流均可用一根水平方向的直线来表示时间，再从这根直线上引出垂直线的高度，以表示其电压或电流的瞬时值。如图 1-5 所示，这种方法能将正弦交流在一周内的变化完整地反映出来。但实际上正弦交流是一种连续的波形，它并没有确定的起点和终点。不过为了说明正弦波全面而真实的情形，还是有必要为正弦波选定一个起点。正弦波的起点及与它由零值开始上升时形成的角度称为初相角，或称为起始相位并用符号 ψ 表示。

同时也可用旋转相量来表示正弦波。这时，相量的长度用来表示正弦电压或电流的最大值，而旋转相量与水平线之间的夹角表示为相角。并且规定以反时针方向旋转为相角的正方向；顺时针方向旋转为相角的负方向；而大于 180° 的相角，可改用较小的负值相角来取代。图 1-5 (a) 所示为导线已转过中性线 θ 角时的位置，也即为计算交变电动势时的起点；图 1-5 (b) 所示为用正弦曲线表示的交变电动势；图 1-5 (c) 所示为旋转矢量所表示的正弦波。

旋转矢量常用来表示几个频率相同但相位不同的电压或电流及相互间的关系。如图 1-6 (a) 所示。在发电机电枢上嵌绕有相同的两个线圈 U 和 V ，这两个线圈的几何位置相差 90° 。根据电枢的旋转方向可以看出，线圈 U 的位置要超前于线圈 V 的角度



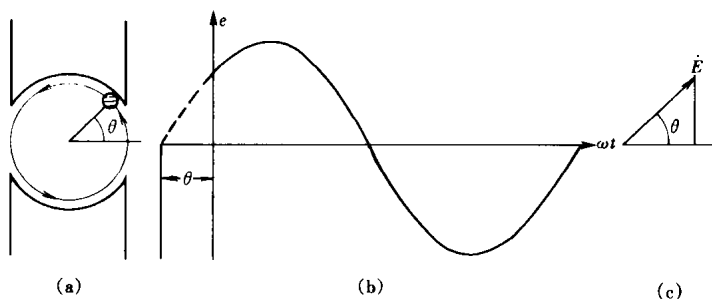


图 1-5 正弦交流电的相量图

(a) 导线位置；(b) 正弦曲线；(c) 矢量表示

为 90° ；图 1-6 (b) 所示为 U、V 两个线圈所产生感应电动势的正弦曲线。从图中可以看出，若以图 1-6 (a) 所示的位置作为正弦波的起始相位，则线圈 U 的相角应为 0° ，线圈 V 的相角则为 90° ；图 1-6 (c) 所示为这两个线圈所产生交变电动势的矢量图，由于这两个线圈用同样的角速度旋转，因此两个旋转矢量间将始终保持相差 90° 相角。

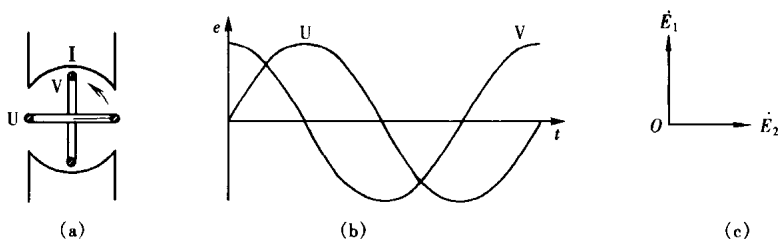


图 1-6 两个线圈所产生的交变电动势

(a) 线圈位置；(b) 正弦波；(c) 矢量图

由此可知，当电枢在磁场中以不变的角速度 ω 逆时针旋转时，两个线圈都将会产生感应电动势，并且其频率相同和最大值也相等。但因两个线圈所处的空间位置不同，从而导致它们的初相角不相等，以至不能同时达到最大值或零值，它们的电动势分别为：

$$e_u = E_{ma} \sin \psi_u$$



$$e_v = E_m b \sin \psi_v$$

式中 ψ_u 、 ψ_v ——为电动势 e_u 、 e_v 的初相角。

如已知电动势的最大值 E_m 和初相角 ψ ，则任意时刻 t 的电动势瞬时值 e 可用下式计算：

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi) \quad (\text{V})$$

两个同频率的正弦量初相角之差（或相位角之差）称为相位差，用 φ 表示。 e_a 和 e_b 的相位差为

$$\varphi = (\omega t + \psi_a) - (\omega t + \psi_b) = \psi_a - \psi_b$$

如果两正弦量存在相位差，称它们为不同相的正弦量；当两正弦量的相位差 φ 等于零时，称为同相的正弦量。

三、三相正弦交流电的产生

三相正弦交流电就是由三个频率相同，但相位互差 120° 电气角度，并且其每相绕组均能在运转时产生按正弦变化的交流电动势。如图 1-7 所示，图 (a) 所示的交流发电机转子上布置有三个相位互差 120° 的线圈。当发电机旋转时，就会在电枢线圈内产生三相交流电动势，而三相间的相位差即为互差 120° 电气角度。图 b 所示该三相正弦交变电动势的变化曲线，图中以 U 相绕组的电动势从零值开始上升时来作为起始相位；V 相绕组的电动势比 U 相滞后 120° 电气角度；W 相绕组的电动势又比 V 相滞后 120° 电气角度（也即 W 相绕组电动势比 U 相超前 120° ）。就是这

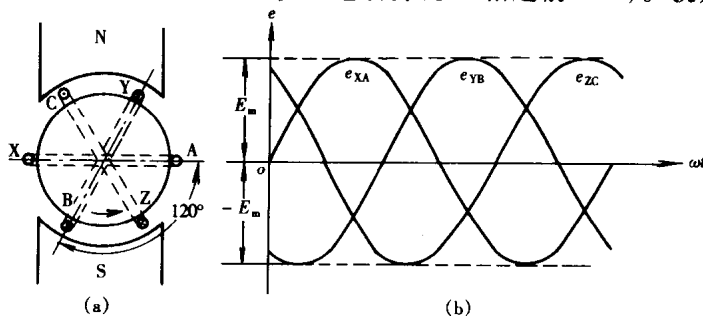


图 1-7 三相正弦交流发电机示意图

(a) 线圈位置；(b) 正弦波形



样，U、V、W 三相绕组依次产生按正弦变化的电动势。由于发电机本身结构是对称的，使它所产生的电动势，在通常情况下将是对称的三相正弦电动势。若以图 b 中 U 相电动势经零值向正值增加的瞬间作为起点，这时 U 相电动势的瞬时值为

$$e_u = E_m \sin \omega t \quad (\text{V})$$

V 相电动势的瞬时值比 U 相滞后 120° 电气角度，即为

$$e_v = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (\text{V})$$

W 相电动势的瞬时值比 V 相滞后 120° 电气角度，即比 U 相滞后 240° 电气角度（或者说是比 U 相超前 120° 电气角度）。即为

$$e_w = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (\text{V})$$

图 1-7 所示为三相正弦交流发电机示意图。而在实际应用中，三相交流发电机的三套绕组是按设计规定的接法进行内部连接，并将三相绕组的 6 根首、尾线端引出，然后按星形或三角形接法连接的。下面将分别简述这两种接法。

1. 星形（Y）接法

将三相绕组的 3 根首端直接作为相线（或称端线）输出，而把三相绕组另外的 3 根尾端并接在一起，作为各相绕组的公共回路，称为中性线（或称零线）。如图 1-8 所示，这种接法称为星形接法。

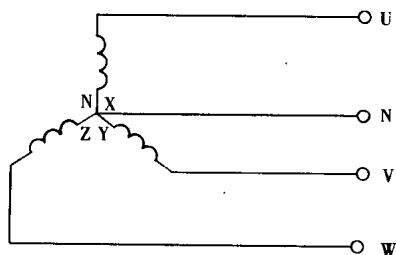


图 1-8 三相四线发电机的星形接法

如图 1-9 所示，当绕组采用星形接法时，用电压表测出的每相绕组首端与尾端之间电压称为相电压。从测量中可以看出，在正常情况下这三个相电压的数值应大小相等。而用电压表所测出的各相绕组首端与首端之间电

压（即相线之间电压），称为线电压。从测量中可知，绕组三个线电压的数值大小也相等。经实践和分析证明，三相绕组在对称



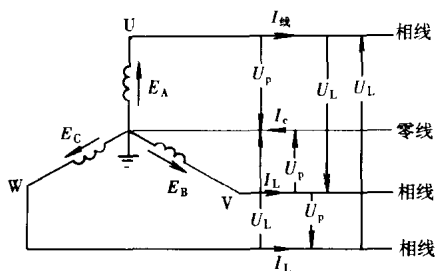


图 1-9 星形接法时的相电压与线电压

条件下，其相电压与线电压之间的相互关系为

$$U_{uv} = \sqrt{3} U_u$$

$$U_{vw} = \sqrt{3} U_v$$

$$U_{wu} = \sqrt{3} U_w$$

即三相对称电源的绕组若按星形接法连接时，其线电压为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。如果电源所联接的三相负载也是平衡对称的，其线电流等于相电流。

2. 三角形 (Δ) 接法

如将三相绕组的首、尾线端依次相连接，以形成一个自行闭合的三角形回路。并以三相的首端、U、V、W 与负载相接，这种接法称为电源的三角形接法，如图 1-10 所示。从图中可以明显看出，三角形接法时其线电压等于相电压。由于三相交流发电机的合成电动势在许多情况下不可能绝对为零值，所以三相绕组中存在的电动势差值将会在这个闭合三角形回路内产生环流。而这种环流将使绕组发热，这种发热对发电机显然是极为不利的。因此，在中小型三相交流发电机绕组中极少采用三角形接法。

按三角形连接的三相发电机绕组，其线电流与流过每相绕组的相电流，在三相负载对称的条件下有着以下关系

$$I_u = \sqrt{3} I_{uu'}$$

$$I_v = \sqrt{3} I_{vv'}$$



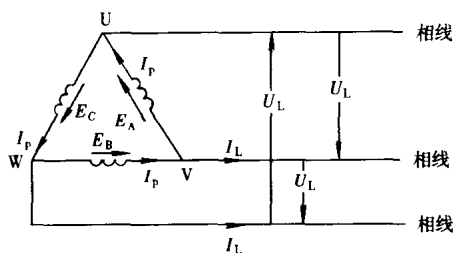


图 1-10 三相交流发电机的三角形接法

$$I_w = \sqrt{3} I_{ww'}$$

式中 I_u 、 I_v 、 I_w ——为 U、V、W 相的线电流；

$I_{uu'}$ 、 $I_{vv'}$ 、 $I_{ww'}$ ——为 U、V、W 相的相电流。

即三相交流发电机绕组三角形接法时，其线电流等于相电流的 $\sqrt{3}$ 倍。

第 2 节 同步发电机的基本型式

交流同步发电机的基本型式分为旋转电枢式和旋转磁场式两种。这两种发电机在结构上虽然有所不同，但其基本原理却是一样的，即磁场与导体只要产生相对运动并切割磁力线，就能在导体中产生感应电动势。在交流同步发电机中，铁心及其在铁心槽中用来产生感应电动势并接通负载供给交流电流的绕组的总称称为电枢。由于它是交流同步发电机进行能量转换和传递的枢纽，所以将它称之为电枢。

一、旋转电枢式

旋转电枢式交流同步发电机的磁场是固定不动的，其电枢为旋转部分，三相交流电流是经滑环和电刷输送出去。这种发电机的优点是可以提高硅钢片的有效利用率，并可以将定子机座作为磁轭以节省钢材。它的缺点是容量难以做大，其额定电压也不高，原因是：

1. 空间限制



旋转电枢所占空间有限，电枢绕组线圈匝数增多和绝缘层的加厚都将受到限制，这就限制了交流同步发电机容量的增大与额定电压的提高。

2. 速度限制

当电枢的旋转速度较高时，将会由于离心力作用和振动致使电枢极易损坏。

3. 绝缘困难

因旋转电枢式发电机电枢绕组的电流是通过滑环和电刷接入外负载的，如果通过的电流太大则容易引起电刷冒火花。而若其额定电压高时，则电刷、滑环的绝缘将会非常困难。因此，旋转电枢式交流同步发电机的额定电压一般不超过 500V。

4. 价格较贵

由于旋转电枢构造复杂、制造成本高，从而导致其产品价格较贵。

因此，旋转电枢式交流同步发电机目前已极少生产，一般只在容量很小的低压小型同步发电机，或在生产实践中利用现有直流电机改为同步发电机时，才会采用这种旋转电枢式的结构型式。此外，旋转电枢式发电机在采用无刷励磁方式的同步发电机中，被用作交流励磁机。

二、旋转磁场式

旋转磁场式交流同步发电机的电枢固定不动，而磁场是不断旋转的。它的电枢绕组嵌放在定子铁心槽内，并且随槽分布在定子铁心整个圆周上。因此，它有更多的空间位置来安放电枢绕组的线圈和绝缘。这种结构型式交流同步发电机的突出优点是：电枢绕组输出的交流电流不必通过运动的滑环和电刷，而是直接由固定的电枢绕组引线电缆送往负载，所以其机械强度和绝缘条件都比较好，因而提高了电枢绕组的安全可靠性。旋转磁场式交流同步发电机的磁极上绕有励磁绕组，而产生发电机转子旋转磁场的励磁电流经电刷和滑环引入励磁绕组。小型交流同步发电机励磁绕组的额定电压较低，励磁电流也较小。由于这些优点，所以

