

小型

单英杰 编著

同步发电机

湖南科学技术出版社

小型同步发电机

单英杰 编 著

*

湖南科学技术出版社出版

湖南省新华书店发行

湖南省新华印刷二厂印刷

*

1978年9月第1版第1次印刷

字数：241,000 印数：1—30,000 印张：11.875

统一书号：15204·15 定价：0.95元

内 容 提 要

本书简要地叙述了小型同步发电机的原理和结构、各种励磁方式和自动电压调节装置、小型同步发电机的各种运行方式,并着重讨论了并联运行中的问题。此外,还介绍了小型同步发电机的使用、维护经验和提高小型同步发电机运行可靠性的一些简易措施及维修方法。

本书可供农村小型水电站、各种交流移动电站以及小型厂矿自备电站的运行、维修电工和技术人员参考。

前 言

在群众办电的热潮中，农村小型水电站和小型厂矿自用电站如雨后春笋遍地皆是。而这些电站大多采用小型同步发电机作为发电设备。不少机关、学校、剧院、商店和医院也安装了小型同步发电机。因此，如何管好、用好这些小型同步发电机，保证它们的安全运行，最大限度地发挥它们在四个现代化建设中的作用，是对从事这项工作的电力工作者提出的一项非常重要而又十分迫切的任务。为此，编著本书，供同志们参考。

在问题的阐述上，力求深入浅出、通俗易懂，着重从物理概念上说明，并从生产需要出发，尽量做到理论与实践相结合。其中部分内容属提高性质，供有兴趣的同志深入钻研时参考。此外，还介绍了国外的一些有关的新技术，供同志们借鉴。

本书的写作，得到了沅江县机械厂领导和同志们的支持与帮助。在修改过程中，得到了中共沅江县委主要领导同志和沅江县工交办公室、沅江县科委以及南大十一万伏输变电工程指挥部的关怀和鼓励。全书承湖南大学电机教研室沈广文主任和赖烈恩讲师审阅，并提出了不少宝贵意见。描图工作由杨明蟾和黄伟高同志完成。作者谨此一并表示深切的谢意。

由于作者水平所限，书中错误和缺点在所难免，请读者批评指正。

湖南沅江县机械厂 单英杰

一九七八年十二月于沅江琼湖

目 录

绪论	(1)
----------	-------

第一篇 小型同步发电机的原理和结构	(3)
-------------------------	-------

第一章 同步发电机的原理	(3)
--------------------	-------

第一节 单相交流发电机	(3)
-------------------	-------

第二节 三相交流发电机	(9)
-------------------	-------

第三节 同步交流发电机	(13)
-------------------	--------

第四节 同步发电机的电枢反应	(18)
----------------------	--------

第五节 同步发电机的等值电路	(22)
----------------------	--------

第六节 小型同步发电机的额定数据	(26)
------------------------	--------

第二章 小型同步发电机的结构	(28)
----------------------	--------

第一节 小型同步发电机的定子结构	(28)
------------------------	--------

第二节 小型同步发电机的定子绕组	(30)
------------------------	--------

第三节 小型同步发电机电势波形的改善	(35)
--------------------------	--------

第四节 小型同步发电机的转子结构	(47)
------------------------	--------

第二篇 小型同步发电机的励磁系统	(55)
------------------------	--------

第一章 小型同步发电机的励磁方式	(55)
------------------------	--------

第一节 带直流励磁机的励磁方式	(55)
-----------------------	--------

• 1 •

第二节	无刷励磁方式.....	(61)
第三节	三次谐波励磁方式.....	(65)
第四节	电抗移相式相位复式励磁方式.....	(74)
第五节	双绕组电抗分流自励恒压方式.....	(83)
第六节	逆序补偿励磁方式.....	(85)
第二章	小型同步发电机的自动电压调节装置	(88)
第一节	炭阻式自动电压调节器.....	(88)
第二节	可控硅分流励磁调节器.....	(95)
第三节	可控硅静止励磁系统.....	(103)
第四节	继电强行励磁与强行减磁.....	(113)
第三篇	小型同步发电机的运行	(116)
第一章	小型同步发电机的对称运行	(116)
第一节	同步发电机的空载特性.....	(117)
第二节	同步发电机的外特性.....	(119)
第三节	同步发电机的电压变化率和调节特性.....	(121)
第四节	同步发电机的损耗、效率和冷却方式.....	(122)
第二章	小型同步发电机的不对称运行.....	(126)
第一节	概述.....	(126)
第二节	不对称运行对小型同步发电机的影响.....	(135)
第三节	小型同步发电机在不对称负载下的温升试验.....	(139)
第三章	小型同步发电机的并联运行	(146)
第一节	小型同步发电机投入并联运行的要求和条件.....	(146)

第二节	手动准同期法并列.....	(147)
第三节	手动自整步法并列.....	(156)
第四节	粗整步(电抗整步)法并列.....	(158)
第五节	小型同步发电机并联运行时有功和无功功率的调节	(167)
第六节	柴油发电机组的振荡问题.....	(189)
第七节	关于三次谐波励磁发电机并联运行的问题.....	(198)
第八节	关于双绕组电抗分流发电机并联运行的问题.....	(216)
第四章	小型同步发电机的其他运行方式	(232)
第一节	小型同步发电机作同步电动机运行.....	(232)
第二节	小型同步发电机作同步补偿机运行.....	(236)
第四篇	小型同步发电机的使用和维护	(241)
第一章	小型同步发电机的配电屏和继电保护	(241)
第一节	小型同步发电机的电气测量仪表.....	(241)
第二节	小型同步发电机的配电屏.....	(256)
第三节	小型同步发电机的继电保护.....	(265)
第四节	小型同步发电机的防雷保护和接地.....	(273)
第二章	小型同步发电机的使用和维护.....	(278)
第一节	小型同步发电机使用的基本规则.....	(278)
第二节	小型同步发电机的维护.....	(286)
第三节	轴承的维护.....	(290)
第三章	小型同步发电机的常见故障及其处理	(295)

第一节	发电机温度升高.....	(295)
第二节	发电机定子绕组损坏.....	(297)
第三节	发电机转子励磁绕组接地.....	(303)
第四节	发电机的非同期并列.....	(306)
第五节	发电机失磁.....	(307)
第六节	发电机升不起电压.....	(308)
第七节	励磁机电刷冒火花.....	(313)
第八节	硅整流元件损坏.....	(315)
第九节	逆励磁现象和仪表失常.....	(318)
第十节	小型同步发电机故障处理几例.....	(321)
附录		(327)
附录一	小型同步发电机常见故障及其处理一览表.....	(327)
附录二	TSWN系列发电机电磁数据汇总表.....	(334)
附录三	TSWN TSN 12~75千瓦自励恒压水轮发电机系列电磁数 据汇总表.....	(350)
附录四	T ₂ 系列小型同步发电机电磁设计数据汇总表	(359)
附录五	小型同步发电机安装尺寸.....	(368)
附录六	小型交流电机定子绝缘规范.....	(370)
附录七	交流电机普通型定子线圈绝缘规范.....	(371)

绪 论

由于小型同步发电机结构简单，投资少，安装快，操作简便，使用灵活，所以在基层厂矿自用电厂和农村小型水电站中，得到了广泛的应用。

随着科学技术的发展，小型同步发电机也不断得到改进。目前，主要是在励磁系统方面，出现了一些新型励磁方式，如三次谐波励磁发电机、双绕组电抗分流自励恒压发电机以及带交流励磁机的无刷励磁发电机等，进一步简化了小型同步发电机的结构，改善了发电机的运行特性，提高了发电机运行的可靠性。

采用新型励磁方式的小型同步发电机在作单机运行时，有良好的特性，很受用户的欢迎。但在并联运行时，常常出现一些问题，如出现“抢无功”和电压、电流、功率的振荡现象。严重时使功率送不出去，以致无法并联运行。对于这些问题，如何从理论上分析原因，从而找出相应的措施，目前国内外都在进行研究。国内不少单位进行了大量的试验，积累了不少经验。

小型同步发电机虽然容量小、电压低，但是若并联运行发生振荡时，其振荡过程相当复杂。特别是柴油机驱动的小型同步发电机，由于柴油机的低频周期转矩的影响，更进一步使振荡过程复杂化。因此，分析柴油机对发电机并联运行时振荡过程的影响，从而采取相应的措施，提高并联运行的稳定性，也是一个值得研究的课题。

由于小型同步发电机，特别是采用新型励磁方式的发电机的普遍使用，还是近年来的事，所以对它的运行方式研究得不够，运行经验也积累得不多，例如对小型同步发电机的不对称运行方式，尽管在一些厂矿常常出现，国标上对其允许的不对称度也有规定，但国内一直研究得少。到底发电机在不对称负载运行时，所引起的定转子的温升情况如何？这种发热对小型同步发电机将产生什么后果？仍是一个值得进一步探讨的课题。

由于小型同步发电机容量小，设计和制造时，对其运行的可靠性远不如大型同步发电机考虑得那样周全，因而常常在运行中出现一些小故障，加之值班人员对这些发电机的特点不够了解，致使一些小故障未能得到及时处理而拖长了停机时间。也还常出现因使用不当而将发电机损坏的情况。特别值得指出的是在并联运行时，一旦出现振荡失步现象，被迫将发电机解列，致使一个小电站里的几台发电机单独供电，这样不但不能充分发挥发电机的效益，而且使供电线路复杂化，增加投资，管理和维护都不方便，所有这些都是在亟待解决的问题。

因此，本书从生产实践的需要出发，在扼要介绍小型同步发电机的原理和结构上的特点的基础上，着重分析小型同步发电机的各种励磁方式和它们的电压自动调节，用较大篇幅讨论它们的各种运行方式和常见的故障，介绍其使用规则和维护经验。此外，还根据农村和基层厂矿的具体条件，因陋就简地提出一些改善小型同步发电机运行性能、提高并联运行的稳定性和处理故障的措施；还介绍了使用普通仪表进行测量，以分析、判断和寻找故障的简易方法。

第一篇 小型同步发电机的 原理和结构

第一章 同步发电机的原理

第一节 单相交流发电机

一、电磁感应和发电机右手定则

当导体在磁场中运动或磁场在导体周围运动，二者相互切割时，就会在导体内产生感应电动势，这种现象就称为电磁感应。如果导体是闭合的，那么在感应电动势的作用下，就会产生电流，这个电流就叫做感应电流。

感应电动势的方向可用“右手定则”来确定，如图1—1—1

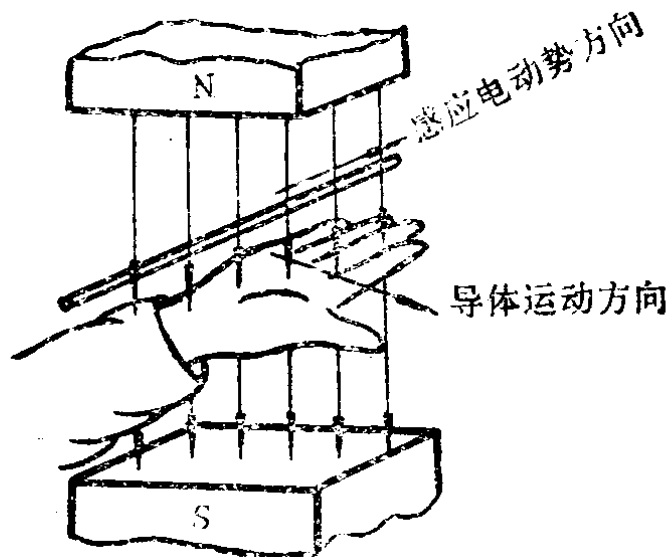


图1—1—1 发电机右手定则

所示，伸开右手，让拇指与其余四指垂直，并且跟手掌在同一平面内，将右手放入磁场中，手心对着磁场的N极，拇指指向导体运动的方向，这时，其余四指所指的方向就是感应电动势的方向。

现在来研究感应电动势的大小是由哪些因素来确定的。由图1—1—2所示，设长度为L的直导线在磁通密度为B的均匀磁场里以速度V运动，导线运动方向与磁力线相交成 α

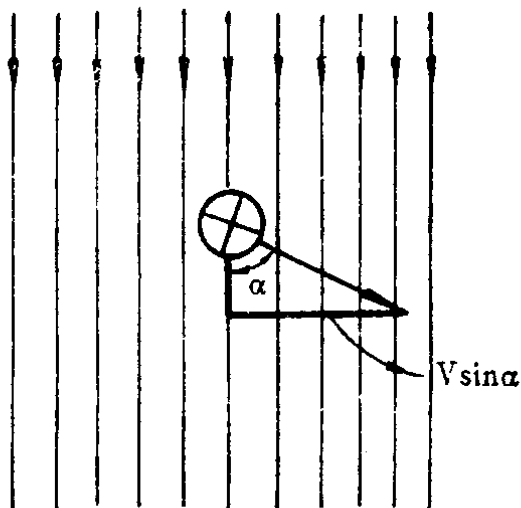


图1—1—2 导体与磁力线成 α 角运动

$$e = BLV \sin \alpha \quad (1-1-1)$$

式中 e —— 感应电动势(伏特)

B —— 磁通密度(韦伯/米²)

V —— 导线运动速度(米/秒)

L —— 导线有效长度(米)

α —— 导线运动方向与磁力线方向的夹角。

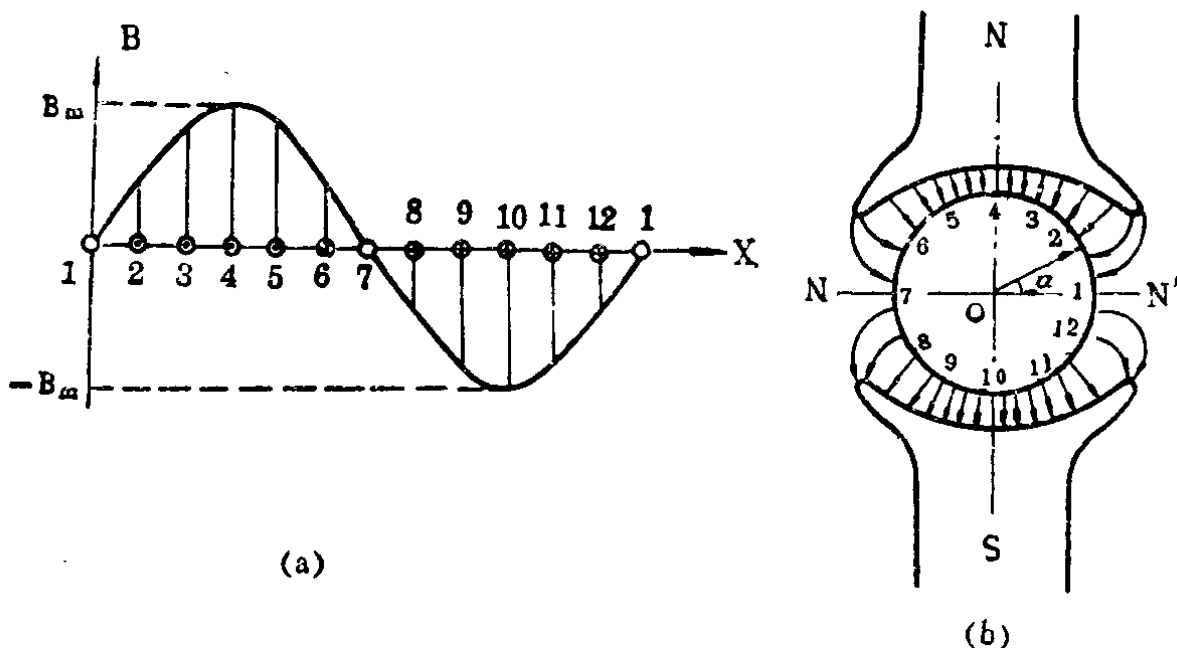
由此可见：

1. 磁场越强，感应电动势就越大。
2. 导线切割磁力线的速度越快，感应电动势就越大。
3. 导线的有效长度越长，感应电动势也越大。
4. 导线运动方向与磁力线方向垂直时，角度 $\alpha = 90^\circ$ ， $\sin \alpha = 1$ ，则感应电动势为最大值。导线运动方向与磁力线方向

平行时，角度 $\alpha = 0^\circ$ ， $\sin\alpha = 0$ ，则感应电动势为零，实际上，导线没有切割磁力线。

二、单相交流电的产生

发电机的定子和转子均由磁性材料组成，而且都做成圆柱表面，导线与发电机轴平行，磁力线在进入和离开转子时，都选取最短路径，也就是均与转子表面垂直。因此，嵌在转子表面的导线切割磁力线的方向在切割的位置都是垂直的，即夹角 $\alpha = 90^\circ$ ，这样一来，要保证导线中产生的感应电动势按正弦规律变化，则要求磁通密度 B 按正弦规律分布。如图1—1—3所示。



(a) 磁通密度 B 在转子铁芯圆周上的分布情况；

(b) 转子铁芯表面上磁通密度的波形图。

图1—1—3 磁通密度 B 沿转子铁芯圆周按正弦规律分布

由电工学中的磁路欧姆定律可知

$$B = \phi = \frac{F_c}{R_c} = \frac{F_c}{\delta} \quad (1-1-2)$$

式中 F_c ——磁极磁场的磁势

R_c ——磁路的磁阻

δ ——发电机定子与转子之间的气隙

图1—1—3(a)中NN'代表发电机磁场的中性面。由于中性面正好处在N极和S极当中，此处的气隙 δ 可视为无穷大，由式(1—1—2)可知，铁芯表面上通过中性面NN'的地方，磁通密度B等于零。而气隙 δ 沿转子的圆周长 x 各点变化着，即有函数 $\delta = f(x)$ 。转子铁芯表面（即线圈旋转时所经过的各个位置）的磁通密度B就随着气隙 δ 的变化而变化，即有曲线 $B = f(\delta)$ 。因为转子是一圆柱体，所以曲线 $B = f(x)$ 为一平滑的正弦曲线。即

$$B = B_m \sin x$$

图1—1—3(a)中，在位置1上($\delta = \infty$)，磁通密度 $B = 0$ ，在位置4上(δ 为最小值)，磁通密度达到正的最大值 B_m ，在位置7上($\delta = \infty$)，磁通密度B又为零，在位置10上(δ 为最小值)，磁通密度达到负的最大值 $B = -B_m$ 。因而磁通密度B的大小在整个转子铁芯表面的圆周上按正弦规律分布，如图1—1—3(b)所示。

由 $e = BLV$ 可知，当导线有效长度 L 和运动速度 V 一定时，感应电动势 e 的大小就决定于磁通密度 B 的大小。当线圈的一边经过图1—1—3(a)所示磁场中的位置1时，由于磁通密度 $B = 0$ ，所以感应电动势 $e = 0$ ；在位置2时，磁通密度稍大些，因而感应电动势也稍大；在位置3时， B 更大，故 e 也相应地更大；在位置4时， B 为最大值 B_m ，那么感应电动势 e 也为最大值 E_m ；经过位置4以后， B 逐渐减小， e 也逐渐减小；到位置7时，因为

$B = 0$ ，所以 $e = 0$ ；导线经过位置 7 后，便进入了另一个磁极下，由于切割磁力线的方向与前半转相反，因此感应电动势 e 的方向也相反。

如果我们把导线在圆周上移动的位置展开，用直角坐标系的横轴表示 α 角，在纵轴上画出导线在不同 α 角时所产生的感应电动势的大小，就可以得到如图 1—1—4 所示的正弦曲线；这

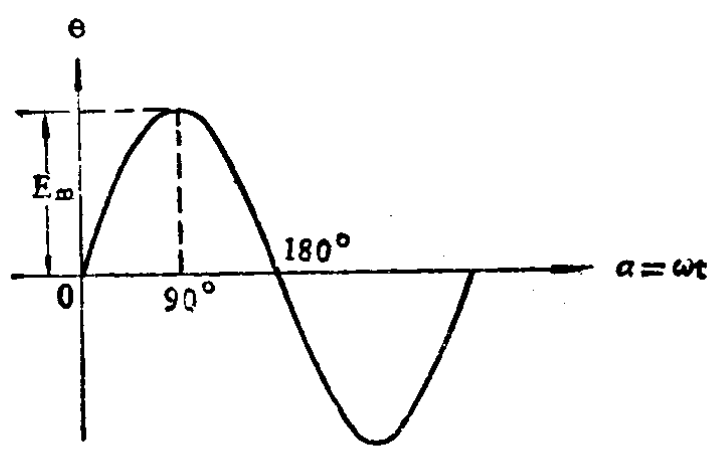


图 1—1—4 正弦电动势的波形图

条曲线表明单相交流发电机绕组中产生的感应电动势随时间是按正弦规律变化的，它是 α 角的函数，用三角函数表示为

$$e = LVB_m \sin \alpha = E_m \sin \alpha$$

需要指出，图 1—1—3(a) 中的发电机模型只有一对磁极，转子旋转一周时，线圈中的感应电动势按正弦规律交变一次。如果发电机的磁极不止一对极，转子旋转一周时，线圈中感应电动势的交变次数就与磁极对数成正比例增多，这样， α 角便不等于线圈位置的空间角了，所以，我们将 α 角叫做电角度。

导线在 1 秒钟内转动的角度，习惯上叫做角频率 ω ，所以导

线在磁场内以角频率 ω 旋转，经过 t 秒之后，所转过的角度 $\alpha = \omega t$ ，因此，上式可换写成

$$e = E_m \sin \omega t \quad (1-1-3)$$

将发电机的磁极按一定的形状制造，即使气隙 δ 按一定规律变化，便可以使得磁通密度 B 在转子铁芯表面上按正弦规律分布。

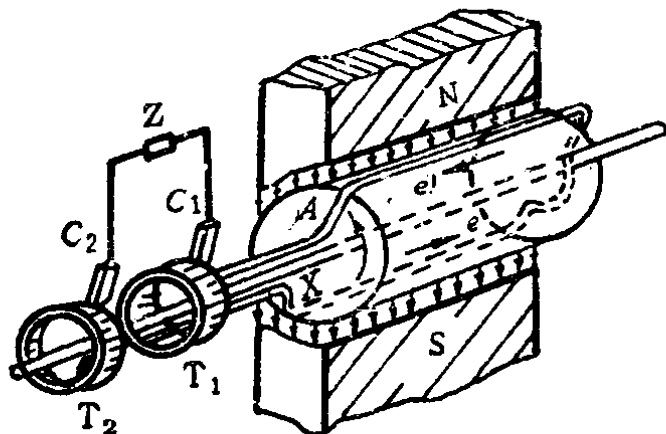


图1—1—5 最简单的单相交流发电机

图1—1—5是最简单的单相交流发电机，它是由一对磁极N、S和一个嵌在圆柱形转子表面的单匝线圈所组成。线圈的两个出线端分别接到两个彼此绝缘的铜环 T_1 和 T_2 上，每只铜环上各装一只电刷 C_1 和 C_2 。当转子由原动机拖动并以匀速旋转时，我们可以应用右手定则，当A边在N极下切割磁力线时，另一边X边在S极下切割磁力线，它们感应的电动势方向永远是相反的，但在A、x两边联接成的线圈中，却是顺序相加的。这样，如果在电刷 C_1 和 C_2 上连接一个负载，那么，就在电刷 C_1 和 C_2 上引出交流电，因为线圈所产生的感应电动势是正弦形的，所以这个交流电流也是正弦形的。

第二节 三相交流发电机

一、三相交流电源

目前，电能的生产、输送和分配，几乎全部采用三相制。工农业用电也绝大部分都是采用三相交流电源。三相交流电源与单相交流电源比较有三个主要优点：

(1) 输电经济，比单相制节省铜25%。

(2) 工农业生产中广泛使用的三相异步电动机具有结构简单、性能良好、工作可靠和价格低廉等优点。而这种异步电动机是以三相交流电为电源的。

(3) 用同样多的材料，三相交流发电机的容量可做得比单相交流发电机扩大50%，而且效率也较高。

频率相同，而相位不同的三个单相交流电源，同时作用在电路中，就叫做三相交流电源。如果这三个单相交流电源的电势（或电压）的有效值相等，频率相同，相位互差 120° 电角度，那么我们就把它叫做三相对称电源，如图1—1—6所示。

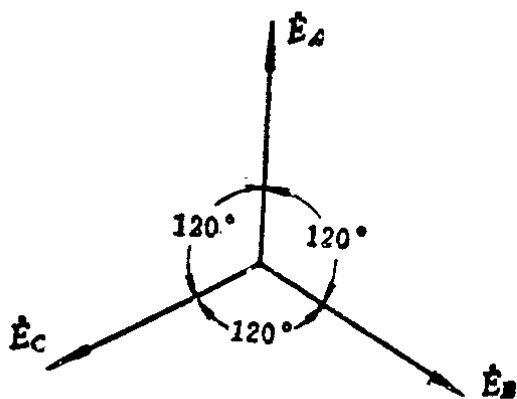


图1—1—6 三相对称电势