

T · B · D · J · J · C

同步电机基础

雷践仁 编著

陕西科学技术出版社

责任编辑 张 敏

封面设计 郑晓都

ISBN 7-5369-2837-8



9 787536 928374 >

ISBN 7-5369-2837-8/TM·36

定价：12.80 元

同步电机基础

雷践仁 编著

陕西科学技术出版社

(陕)新登字第 002 号

内 容 提 要

本书从同步电机的基本结构、内部电磁过程和运行特性等方面,分别介绍了同步电机的基本知识、交流电机的绕组和电势、交流电机绕组的磁势、同步发电机的基本理论、同步发电机的并联运行、同步电动机和调相机、同步发电机的不对称运行、同步电机的突然短路,并附图作了详细的说明,可作为发电厂职工自学或培训教材,也可供有关技术人员参考。

同步电机基础

雷践仁 编著

陕西科学技术出版社出版发行

(西安北大街 131 号)

新华书店经销 西安理工大学印刷厂印刷

850 毫米×1168 毫米 大 1/32 开本 5.625 印张 145 千字

1998 年 3 月第 1 版 1998 年 3 月第 1 次印刷

印数:1—1000

ISBN 7-5369-2837-8/TM·36

定价: 12.80 元

前 言

同步电机是一种重要的旋转电机。它既可用作发电机，又可用作电动机。作为发电机是同步电机最主要的用途。目前，电力工业的三相交流电能几乎全部采用同步发电机来生产。作为电动机则主要用来拖动大容量、不需调速的机械负载，例如大型水泵、球磨机、空气压缩机、鼓风机等。可以说，大容量机械能——电能的相互转换全部是通过同步电机实现的。因此，为了保证电力工业生产的安全和电能质量，电气工作人员特别是发电厂的电气工作人员必须掌握同步电机的结构和运行特性。

电力工业是国民经济发展的先行官。我国社会主义“四化”建设突飞猛进，对电力工业提出了更高的要求，大量新生力量的技术培训任务亦愈加繁重。特别是相对于普遍已熟悉的异步电机而言，同步电机不仅结构和内部电磁过程较复杂，而且运行特性也截然不同。因此，在提高电力行业职工业务素质过程中，需要有以通俗易懂、由浅入深的方式简明扼要地对同步电机的基本结构、内部电磁过程和运行特性予以阐述的书籍。本书就是为此而编写的。

本书共分8章：同步电机的基本知识、交流电机的绕组和电势、交流绕组的磁势、同步发电机的基本理论、同步发电机的并联运行、同步电机和调相机、同步发电机的不对称运行和同步电机的突然短路。

本书可作为有关电力职工自学或培训的教材，也可供有关技

术人员参考。

在本书出版过程中，得到陕西科技出版社张敏同志、西安理工大学水利水电学院李琨、沈珞珞两同志和西安理工大学印刷厂王复长厂长的大力帮助，特此致以衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中错误、欠妥之处在所难免，诚恳希望读者提出宝贵意见。

雷践仁

1998年1月

目 次

第 1 章 同步电机的基本知识	
1.1 概 述	(1)
1.2 同步电机的基本结构	(2)
1.3 同步电机的励磁方式简介	(6)
1.4 同步发电机的发热和冷却简述	(10)
1.5 同步电机的额定值	(13)
第 2 章 交流电机的绕组和电势	
2.1 概 述	(16)
2.2 槽电势星形图	(21)
2.3 三相绕组	(22)
2.4 在正弦分布磁场下的绕组电势	(28)
2.5 在非正弦分布磁场下绕组的谐波电势	(33)
2.6 电势中谐波的削弱方法	(35)
2.7 分数槽绕组	(40)
第 3 章 交流电机绕组的磁势	
3.1 概 述	(46)
3.2 单相绕组的脉振磁势	(46)
3.3 三相绕组合成磁势的基波	(57)
3.4 三相绕组合成磁势的高次谐波	(63)
第 4 章 同步发电机的基本理论	
4.1 概述	(68)
4.2 对称负载时的电枢反应	(68)
4.3 电枢反应电抗和同步电抗	(74)
4.4 同步发电机的电势方程式和相量图	(77)

4.5	同步发电机的开路、短路、零功率因数特性及电抗测定	(83)
4.6	同步发电机的外特性和调节特性	(92)
第5章	同步发电机的并联运行	
5.1	同步发电机的并联	(99)
5.2	同步发电机的功率平衡方程式和功角特性	(108)
5.3	同步发电机有功功率的调节及静态稳定的概念	(115)
5.4	同步发电机无功功率的调节及V形曲线	(120)
5.5	同步发电机振荡的概念	(123)
第6章	同步电动机和调相机	
6.1	概述	(129)
6.2	同步电动机的基本原理	(130)
6.3	同步电动机的基本方程式、相量图和功角特性	(132)
6.4	无功功率的调节	(135)
6.5	同步电动机的起动	(138)
6.6	同步调相机	(145)
第7章	同步发电机的不对称运行	
7.1	概述	(150)
7.2	不对称稳态运行时的各相序电抗	(150)
7.3	单相及两相稳态短路	(153)
第8章	同步电机的突然短路	
8.1	概述	(160)
8.2	同步发电机三相突然短路的物理过程	(161)
8.3	瞬变电抗和超瞬变电抗	(166)
8.4	突然短路电流及其衰减时间常数和电抗的范围	(168)

第 1 章 同步电机的基本知识

1.1 概 述

同步电机是一种交流旋转电机,运行时它的转速 n 、极对数 p 与所接交流电网的频率 f 之间有着严格不变的关系:

$$n = \frac{60f}{p} = n_1 \quad (1-1)$$

可见,同步电机的转速 n 恒等于同步转速 n_1 ,这是它的最大特点并由此而得名。我国电力工业规定的标准频率 $f = 50 \text{ Hz}$,是一个固定不变的数值,因此同步电机的转速与极对数之间成反比例关系。如 $p = 1$,则 $n = 3\,000 \text{ r/min}$; $p = 2$,则 $n = 1\,500 \text{ r/min}$;其余类推。正常运行时,电机的极对数是固定不变的,因此同步电机的正常运行转速是恒定不变的。

同步电机既可作为发电机,又可用作电动机。作为发电机是同步电机最主要的用途。目前,电力工业的三相交流电能几乎全部采用同步发电机来生产。作为电动机则主要用来拖动大容量、不需调速的机械负载,例如大型水泵、球磨机、空气压缩机、鼓风机等。

同步电机除能进行机械能——电能的相互转换外,还可向电网供给(或吸收)滞后无功功率。为了提高输送电能的经济性和保持电网的电压水平,在电力系统中广泛采用专门发出(有时也吸收)滞后无功功率的同步电机,即所谓同步补偿机或同步调相机。

它实际上是一种空载(不拖动机械负载)的电动机,通常安装在电力网的枢纽变电所或电力负载中心的变电所内。为了解决电力系统无功功率不足的问题,同步发电机有时也作调相运行。例如在枯水季节,水电站的水轮发电机常作调相运行,向电网发出无功功率。

1.2 同步电机的基本结构

同其它旋转电机一样,同步电机也是由定子和转子两大部分组成,一般采用旋转磁极式结构:定子上有三相交流绕组;转子上则有励磁绕组,通入直流电流产生磁场。

1.2.1 定子

同步电机的定子也常称为电枢,在构造上和感应电机的定子相似,也是由机座、定子铁芯和绕组等构成。

机座用来固定定子铁芯,并构成通风系统的外壳。小容量同步电机一般采用铸铁机座,中、大容量同步电机则采用钢板焊接机座。

定子铁芯由 $0.35 \sim 0.5$ mm 厚的硅钢片冲制后叠装而成。通常铁芯沿轴向分为若干叠片段,段与段之间留有通风槽。整个铁芯两端用非磁性端压板和拉紧螺杆压紧固定于机座上。当冲片外圆直径大于 1 m 时,由于材料标准尺寸的限制,必须做成扇形冲片,再按圆周拼合起来叠装成定子铁芯。

定子绕组亦称为电枢绕组,一般为三相绕组,其绕法将在第 2 章中介绍。

1.2.2 转子

同步电机的转子有凸极式及隐极式两种结构形式。

图 1-1(a)为凸极式转子示意图。沿转子圆周均匀地安装着若干对凸出的磁极 1,极身上套装着集中的励磁绕组 2,各磁极的

励磁绕组串联起来经滑环 4 和电刷 5 通以直流电,于是在磁极中便产生磁通。此磁通对转子是不变化的,因此磁极通常不需硅钢片而用普通钢板冲制叠装而成,小型同步电机有时也用整块钢做成磁极。磁极通过 T 型尾部(或紧固螺杆)固定在磁轭 6 上。

为了抑制同步发电机在运行中可能产生的振荡和起动同步电动机,叠装式磁极表面通常装有类似笼型异步电机转子上的短路绕组 3,在发电机中称为阻尼绕组,在电动机中称为起动绕组。它的作用详见 3.5 和 4.4。整块式磁极具有短路绕组的作用,一般不再加装短路绕组。

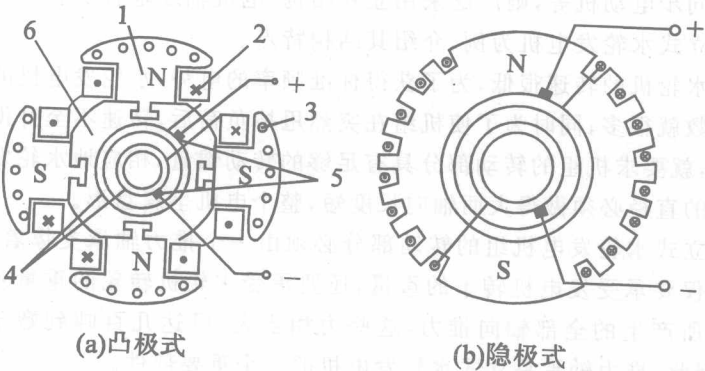


图 1-1 同步电机转子的基本型式

图 1-1(b)为隐极式转子示意图。隐极式转子一般由整块高强度和具有良好导磁性能的合金钢锻制加工成圆柱体,表面铣槽。励磁绕组是分布绕组,分布在各槽中。直流励磁电流一般经电刷、滑环通入励磁绕组。转子表面在一个极距内约有 $1/3$ 的部分没有开槽,形成所谓大齿,就是磁极的极面,大齿的中心是磁极的中心。同整块式凸极磁极一样,隐极式转子一般不装设短路绕组。

制造及运行的经验表明,凸极结构转子的优点是制造方便,但

机械强度较差,因此多用在转速较低、离心力较小的中小型电机中;或用在受原动机(如水轮机)、机械负载(如大型水泵)低转速的限制,具有较多极数的大功率电机中。隐极转子的优点是机械强度高,但制造工艺较复杂,因此多用于转速较高、离心力较大的电机中。例如汽轮机(或燃气轮机)是高速原动机,所以火电厂中的汽轮发电机一般都采用隐极式转子。

1.2.3 立式同步电机的结构特点

隐极式和中、小型凸极式同步电机多采用卧式结构,电机轴线水平安装。而大型凸极式同步电机,如大容量水轮发电机、大型水泵用同步电动机等,则广泛采用立式结构,电机轴线垂直安装。下面以立式水轮发电机为例,介绍其结构特点。

水轮机的转速很低,为了获得标准频率的电势,水轮发电机的极对数就很多;同时为了使机组在突然甩掉负荷后,转速不至升得过高,就要求机组的转动部分具有足够的转动惯量,相应地水轮发电机的直径必须做得大而轴向长度短,整个电机呈扁盘形。

立式水轮发电机组的转动部分必须由一个推力轴承支撑着,它不仅要承受发电机转子的重量,还要承受水轮机转轮的重量及水流所产生的全部轴向推力,这些力相当大,可达几百吨到数千吨,因此,推力轴承是立式水轮发电机的一个重要部件。

按照推力轴承的安装位置,立式水轮发电机可分为悬式和伞式两种基本结构形式,如图 1-2 所示。

1、悬式结构的推力轴承位于发电机转子的上部(一般安装在荷重的上机架内),整个转子通过推力轴承悬挂在机架上。其优点是转子的重心位置在推力轴承以下,机组运行时的稳定性较好,并且推力轴承在发电机层,安装维护较方便,轴承损耗也较小。但推力轴承的荷重须经上机架、定子机座传递到基础,故需上机架直径大,消耗钢材较多,且使机组轴向长度增大,厂房高度也需要增加。

为使机组转动部分径向定位,需合理配置导轴承。在图 1-2

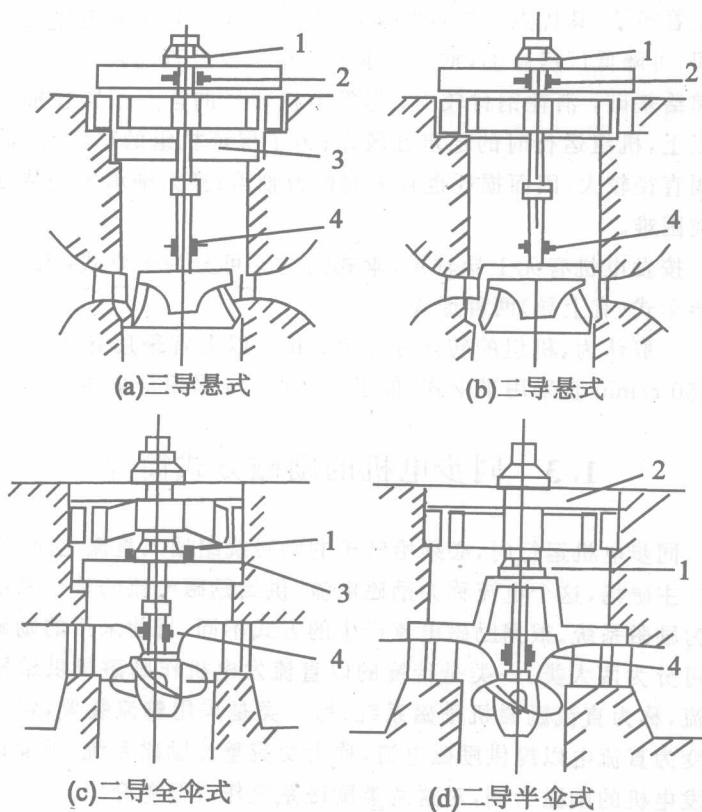


图 1-2 立式水轮发电机

1—推力轴承 2—上导轴承 3—下导轴承 4—水轮机导轴承

(a)所示的结构中,发电机配置了上、下两个导轴承,分别安装在上、下机架中,连同水轮机的导轴承,构成三个导轴承的悬式结构形式(三导悬式)。图 1-2(b)则取消了发电机的下导轴承和下机架,构成二导悬式的结构形式。

2、伞式结构的推力轴承位于发电机转子的下方，象“托伞”一样托着转子。其优点是结构紧凑，充分利用了水轮机和电机之间的空间，可降低厂房高度，推力轴承的荷重可仅经直径较小的下机架传递给基础，消耗钢材较少。但发电机转子的重心位置在推力轴承以上，机组运行时的稳定性较差；为了保证机组的稳定性，需要采用直径较大，因而损耗也较大的推力轴承；推力轴承的安装维护亦较困难。

按发电机有无上导轴承，伞式结构又可分为全伞式（无上导）和半伞式（有上导）两种形式。

一般认为，机组的转速在 150 r/min 以上宜采用悬式，在 100 ~ 150 r/min 宜采用半伞式，低于 100 r/min 采用全伞式。

1.3 同步电机的励磁方式简介

同步电机运行时，必须给转子的励磁绕组通入直流电流，以便建立主磁场，这个电流称为励磁电流，供给励磁电流的整个系统则称为励磁系统。根据励磁电流产生的方式不同，目前采用的励磁系统可分为两大类：一类是传统的以直流发电机作励磁机供给励磁电流，称为直流励磁机励磁系统；另一类是采用整流装置，将交流电变为直流电以提供励磁电流，称为交流整流励磁系统。下面以同步发电机的励磁为例，对这两类励磁系统作一简单介绍。

1.3.1 直流励磁机励磁系统

接线原理如图 1-3 所示。通常采用并励直流发电机作励磁机，即励磁机的磁极励磁电流 I_{H1} 亦由其电枢 L 提供。调节串接于励磁机励磁绕组 6 回路的磁场变阻器 R_1 阻值的大小，可以改变励磁机电枢 L 两端的电压，从而改变主发电机（同步发电机）的励磁电流 I_f 的大小，以便维持主发电机电枢 1 的端电压为额定值或仅在额定值附近变化，并调整主发电机的无功功率。 I_f 是通过固定于

机壳内的电刷 3 及与主发电机转子一起旋转的滑环 4 加入励磁绕组 2 的。开关 K 的作用是当电网发生故障,使电压突然下降时,由自动装置立即将 K 闭合而短接 R_1 ,使励磁机的输出电压迅速大幅度升高,以适应对同步发电机进行强励的要求。

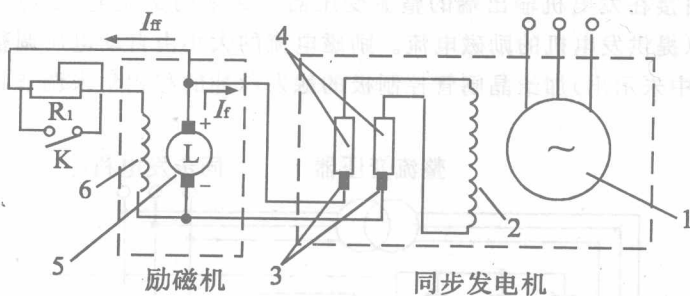


图 1-3 直流励磁机励磁系统原理图

- 1—主发电机电枢 2—主发电机励磁绕组 3—电刷
4—滑环 5—励磁机电枢 6—励磁机励磁绕组

直流励磁机一般与主发电机装在同一转轴上,称作同轴励磁机。由于直流励磁机是独立的电源,与交流电网没有联系,因此运行可靠。为了提高强励时的电压上升速度,直流励磁机本身的励磁电流 I_{ff} 有时采用他励方式,由同轴的副励磁机供给。

这种励磁方式的应用最早,整个系统比较简单,有丰富的运行经验。但是,随着主发电机单机容量的增大,相应的励磁容量也增大,而大容量直流发电机在制造和运行维护中遇到困难,因此直流励磁机励磁系统一般广泛用于中、小型电机中。由于整流技术的迅速发展,不但解决了大容量机组的励磁问题,而且其性能优异,已部分取代了直流励磁机励磁系统,且有全部取代的趋势。

1.3.2 静止交流整流励磁系统

静止交流整流励磁系统可分为自励式和他励式两种,现分述

如下：

1、自励式系统

自励式又可分为自并励与自复励两种，下面仅介绍应用较广的自并励励磁方式。如图 1—4 所示。晶闸管(可控硅)整流装置 3 把由接在发电机输出端的整流变压器 2 送来的交流电，变为直流电以提供发电机的励磁电流。励磁电流的大小由自动电压调整器(图中未示出)加给晶闸管控制极的触发脉冲的移相角来调节。

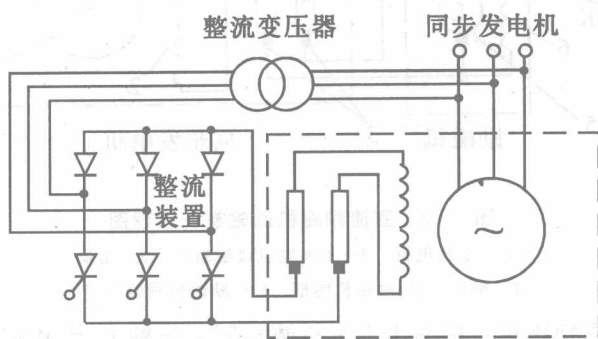


图 1—4 自并励式静止交流整流励磁系统原理图

这种励磁方式的优点是：1) 励磁系统是静止的。没有旋转的励磁机，便于维护；2) 反应速度快，这对强励是很有利的。其主要缺点是励磁能量取自电网，受电网运行情况的影响较大。这种励磁方式已广泛用于中、小型同步发电机。

2、他励式系统

系统原理如图 1—5 所示，它由交流励磁机交流副励磁机、硅整流装置和自动电压调节器等所组成。工作时，主发电机的励磁电流由它与同轴的交流励磁机发出的交流电经静止的硅整流装置整流后供给。交流励磁机的励磁电流则由交流副励磁机(国内多采用

400Hz 的中频发电机)经晶闸管整流装置整流后供给。至于交流副励磁机的励磁电流,开始可由外部直流电源供给(他励),待建压后改由自励恒压装置供给(自励),并保持其端电压恒定。主发电机励磁电流的调节,是由自动电压调整器控制晶闸管整流装置,从而控制交流励磁机的输出来实现的。自动电压调整器的主要任务是自动保持发电机的端电压为给定值和使发电机担负合理的无功负荷,所以需要通过电压互感器和电流互感器取得发电机在运行时的电压和电流信号。

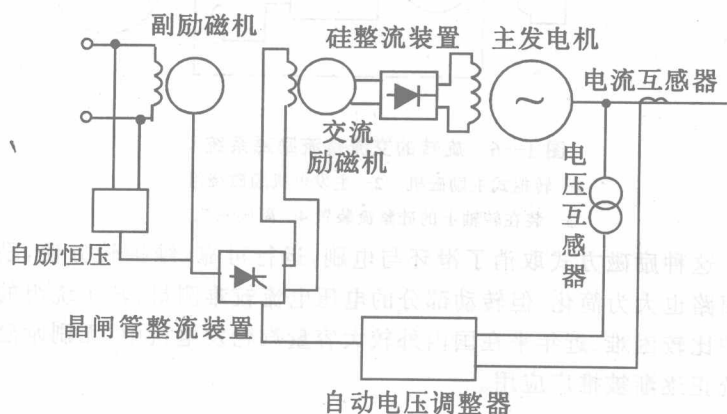


图 1—5 他励式静止交流整流励磁系统原理图

这种励磁系统目前在国内外大型机组上已广泛采用,它没有直流励磁机的换向问题,运行维护方便,技术性能也好。

1.3.3 旋转的交流整流励磁系统

静止交流整流励磁系统虽然未采用直流励磁机,不存在换向火花问题,但主发电机仍保留滑环与电刷,在励磁电流过大或要求防腐、防爆的场合,还是不适宜的。如果交流励磁机采用旋转电枢式三相同步发电机,使交流励磁机的电枢与主发电机的转子同轴