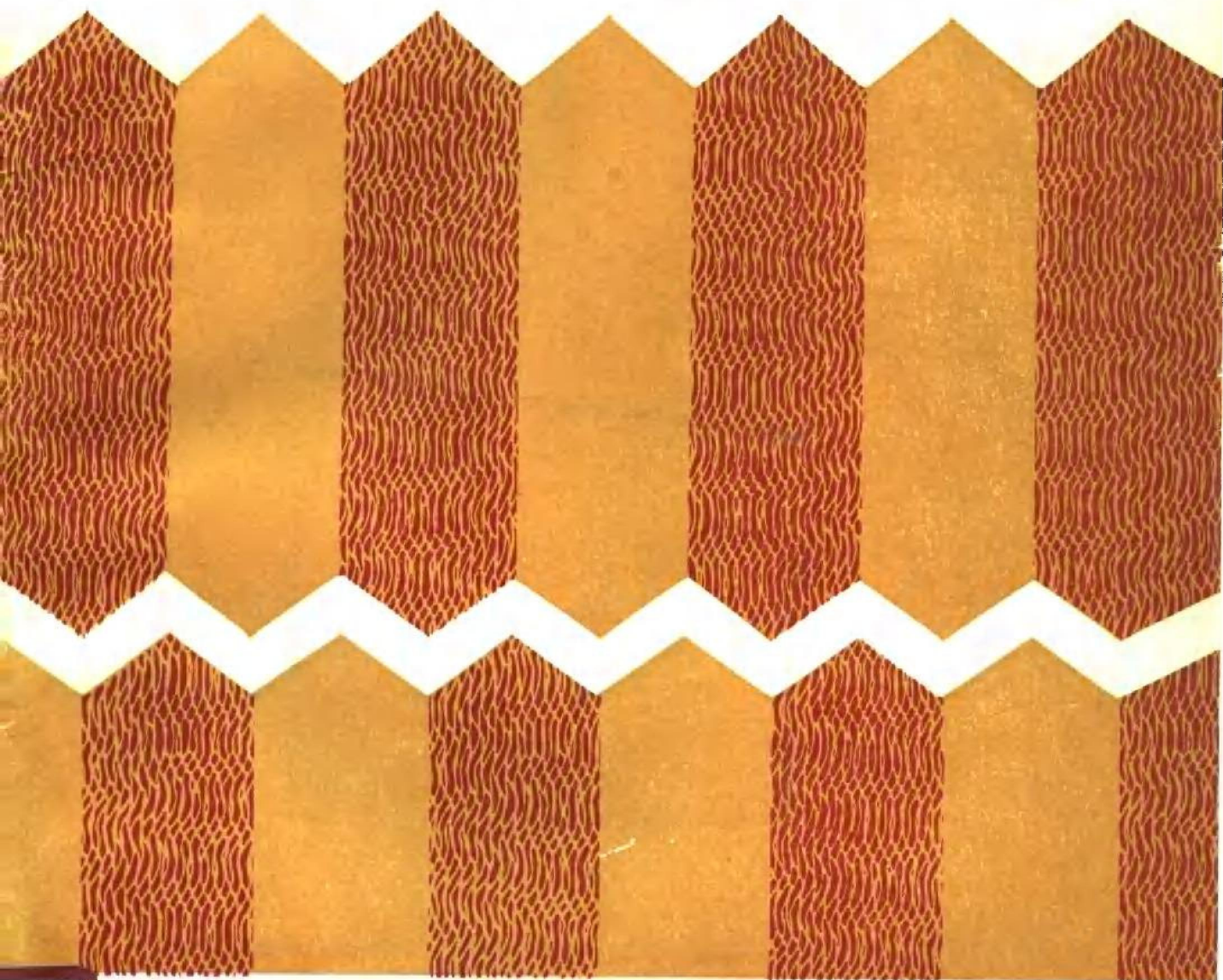


电 机 学

下 册

艾维超 主编



机械工业出版社

本书共分两册。上册三篇分别介绍电机的基本理论和工程问题、磁路计算和变压器、交流绕组和异步电机；下册三篇分别介绍同步电机、直流电机、特种电机。本书对电机的论述体系与其它书有所不同，其内容丰富、讲述细致。每章后有大量习题，便于读者自学。

本书可作为高等院校电机专业的教材，也可供有关工程技术人员自学参考用。

电 机 学

下 册

艾维超 主编

*

责任编辑：陈建行 责任校对：江新建

封面设计：方 芬 版式设计：张世琴

责任印制：卢子祥

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

人民交通出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张19 3/4·字数 484千字

1991年1月北京第一版·1991年1月北京第一次印刷

印数 00,001—1,450·定价：14.30 元

*

ISBN 7-111-02370-6/TM·314

前 言

随着科学技术的不断发展,生产和社会活动中的自动化程度日益提高。由于今后对能源的需求更为急切,作为能量转换重要工具的电机将承担更复杂而繁重的任务。对电机的要求不断提高,不仅要求容量大、品种翻新,而且要求能在各种条件下工作,控制方便,效率高,高度可靠。在这新形势下,电机学这门重要的技术基础课有必要不断予以改进和充实。

为适应技术发展的需要,电机学教材应在以下方面予以改进:①近年来科学技术的新成就已深刻影响着电机的生产和使用,电机学中除必要的经典理论外,对新技术必须有所适应。例如电子技术已广泛应用于各行各业,在电机的控制方面效果特别显著,现正在发展将电子控制与电机合成一体的新型电机。因此必须重视电子技术与电机的结合。又如随着生产自动化程度的提高,已不能满足于对电机的静态研究,必须增加有关动态问题的分析。②电机新品种和新的工作方式越来越多,但电机学教材的内容不允许无限扩大。因此必须着重研究各类电机的共性问题,深入了解电机中能量传递和转换的规律以及它在各种电机中的不同反映,以求掌握电机中最本质的原理。此外应重视分析问题的方法,以使读者有办法解决所遇到的各种实际问题。③为了贯彻科学技术为经济建设服务的方针,在重视系统理论的同时,在教材中要加强生产观点和经济观点,使读者习惯于使科学技术与生产、理论与实践更密切地结合,为学好后续专业课作好准备。④大学教材要不断改进,以适应学时要减少,质量要提高,并注意培养学生的自学能力等各项要求。因此教材必须充分考虑适合学生自学的需要,应力求把问题提得明确,引导思考方法,提示解决问题的途径,使学生自学后能独立解决问题。

本书系由上海工业大学艾维超主编,邹景祥和边文纲参加编写,经胡之光及电机教研室各同志提出建议,并经三届学生试用后重新修改而成。

本书在编写中曾蒙福州大学卓忠疆教授等同志提出不少宝贵意见,并得到上海电机厂、上海变压器厂、上海南洋电机厂、革新电机厂、人民电机厂、跃进电机厂的大力支持,谨此致谢。

编 者

目 录

第4篇 同步电机

第23章 同步电机的基本工作原理、用途、 分类和结构..... 1

- 23.1 同步电机的基本工作原理及用途..... 1
- 23.2 同步电机的分类与基本结构..... 3

第24章 同步发电机的对称运行分析..... 9

- 24.1 空载运行分析..... 9
- 24.2 隐极同步发电机的对称负载运行
分析.....11
- 24.3 凸极同步发电机的分析方法.....27
- 24.4 单机运行时的能量传递.....38

第25章 同步发电机的并联运行.....47

- 25.1 同步发电机与无穷大电网并联运行.....47
- 25.2 两台容量相近的同步发电机并联运行.....58

第26章 同步电机的励磁方式.....65

- 26.1 概述.....65
- 26.2 自励式励磁系统.....66
- 26.3 他励式励磁系统.....70

第27章 同步电动机和补偿机.....73

- 27.1 同步电动机.....73
- 27.2 反应式同步电动机.....77
- 27.3 同步异步电动机.....79
- 27.4 同步补偿机.....79

第28章 同步发电机的不对称运行.....84

- 28.1 不对称运行的分析方法.....84
- 28.2 相序阻抗.....85
- 28.3 发电机不对称短路的分析.....88
- 28.4 不对称运行的影响.....92

第29章 同步电机运行中的动态问题.....94

- 29.1 概述.....94
- 29.2 三相突然短路的分析.....94
- 29.3 不对称突然短路的概念.....104
- 29.4 突然短路的影响.....105
- 29.5 同步电机的振荡.....106
- 29.6 同步发电机动态稳定概念.....111

第5篇 直流电机

第30章 直流电机的基本工作原理、用途、 结构和分类..... 117

- 30.1 直流电机的基本工作原理和用途..... 117
- 30.2 直流电机的结构与分类..... 119

第31章 直流电机电枢绕组及其感应电动 势..... 124

- 31.1 单叠绕组..... 125
- 31.2 复叠绕组..... 127
- 31.3 单波绕组..... 129
- 31.4 复波绕组..... 132
- 31.5 电枢绕组的均压线 and 对称条件..... 134
- 31.6 蛙形绕组..... 138
- 31.7 电枢绕组的感应电动势..... 140

第32章 直流电动机的运行原理..... 145

- 32.1 直流电动机的励磁方式..... 145
- 32.2 直流电动机的电枢反应..... 146
- 32.3 电动机的电磁转矩..... 148
- 32.4 电动机稳态运行时的能量传递及功率、转
矩、电压的平衡规律..... 149

第33章 直流电动机的稳态特性..... 156

- 33.1 不同励磁方式电动机的稳态特性..... 156
- 33.2 电动机不同方式制动运行的机械
特性..... 161

第34章 直流电动机的动态分析..... 167

- 34.1 直流电动机的动态性能指标及评价
方法..... 167
- 34.2 直流电动机的动态特性..... 168
- 34.3 直流电动机动态参数计算及测量..... 176

第35章 直流电动机的起动和调速..... 183

- 35.1 直流电动机的起动..... 183
- 35.2 直流电动机的调速..... 188

第36章 直流发电机..... 195

- 36.1 并励发电机的自动建压..... 195
- 36.2 直流发电机的转矩、功率和电压平衡方

程式	196	43.1 磁阻电动机	262
36.3 直流发电机的工作特性	198	43.2 磁阻式低速电动机	268
第 37 章 直流电机的换向	206	第 44 章 磁滞电机	273
37.1 换向原理	206	44.1 作用原理	273
37.2 产生火花的原因	212	44.2 磁滞电机的结构	274
37.3 改善换向的方法	214	44.3 性能分析	274
37.4 环火和补偿绕组	215	44.4 磁滞电机的特点及其应用	278
第 38 章 晶闸管整流电源及其在直流电动机拖动系统中的应用	218		
38.1 晶闸管整流电源和晶闸管整流电源供电的直流电动机拖动系统	218	第 7 篇 各类电机的共性问题	
38.2 晶闸管整流电源对直流电动机的影响	223	第 45 章 电磁功率和功率的传递	279
		45.1 电磁功率的不同形式	279
		45.2 各种电机中有功功率的平衡	281
		45.3 无功功率和无功功率的平衡	281
		第 46 章 电机的容量	284
		第 47 章 各类电机的统一性和运行的可逆性	287
		47.1 各类电机的统一性	287
		47.2 电机的可逆性	288
		第 48 章 电机的工作特性	290
		48.1 发电机和变压器的外特性	290
		48.2 电动机的机械特性	291
		48.3 调节特性	293
		48.4 其他特性	294
		第 49 章 主要的分析方法	295
		49.1 几个平衡规律	295
		49.2 谐波分析	295
		49.3 主磁通和漏磁通	297
		49.4 等值电路	299
		结尾语 电机的发展前景	301
		英中名词对照	303
		参考文献	309
第 6 篇 特种电机			
第 39 章 交流换向器电机	227		
39.1 特点和分类	227		
39.2 三相交流换向器电机	227		
39.3 单相交流换向器电机	236		
39.4 交流换向器电机的换向问题	238		
第 40 章 永磁电机	240		
40.1 永磁电机的用途及发展情况	240		
40.2 永久磁体的特性及种类	240		
40.3 永磁电机的特殊问题	242		
第 41 章 直线异步电动机	249		
41.1 概述	249		
41.2 直线异步电动机的结构及特点	250		
41.3 直线异步电机的分析方法与性能	253		
第 42 章 超导电机	257		
42.1 超导性及超导材料	257		
42.2 超导电机	258		
第 43 章 磁阻电机	262		

第4篇 同步电机

第23章 同步电机的基本工作原理、用途、分类和结构

23.1 同步电机的基本工作原理及用途

23.1.1 基本工作原理

同步电机 (synchronous machine) 是一种常用的交流电机。图 23-1 为同步电机的构造原理图。它的定子和异步电机相同, 由电工钢片叠成。在叠片上冲有槽, 槽内放置各相绕组 (图中只画了一相的两个线圈)。已加工完毕的中等容量的同步电机的定子如图 23-2 所示。同步电机转子上装有磁极 (pole) 和励磁绕组 (excitation winding)。同步电机的转子见图 23-3。

同步电机在工作时, 转子上的励磁绕组要通入直流电流以产生磁场。

如果用一个旋转机械拖动转子转动, 使转子磁场与定子绕组之间有相对运动; 这样就会在定子绕组中感应出交变电动势, 电机成为发电机。在电机中既作为磁路又置放着导体以产生感应电动势担负机电能量转换的部分称为电枢 (armature)。电枢上的绕组称为电枢绕组 (armature winding) 电枢绕组在定子内时, 也称为定子绕组。定子槽内每一根导体的感应电动势 e 的表达式为

$$e = Blv \quad (23-1)$$

式中 B ——导体所在位置的气隙磁通密度;

l ——导体在槽中的有效长度;

v ——导体与磁场的相对速度。

电机以恒速 n 转动时, 导体的感应电动势 e 随时间变化的波形 $e(t)$ 将与磁通密度在气隙中沿圆周分布的空间波形 $B(x)$ 有直接关系。磁场的空间分布为正弦时, 感应电动势的时间波形也为正弦形。如果定子的三相绕组对称, 则能从绕组输出端得到三相对称交变电动势, 它的频率 f 与转子的转速 n 、极对数 p 之间的关系为

$$f = \frac{pn}{60} \quad (23-2)$$

n 的单位为 r/min , f 的单位为 Hz 。

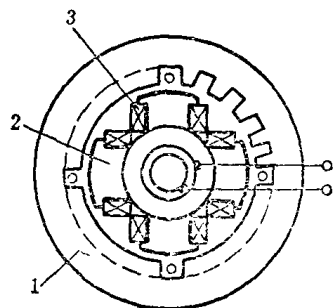


图 23-1 同步电机的构造原理图

1—定子 2—磁极 3—励磁绕组

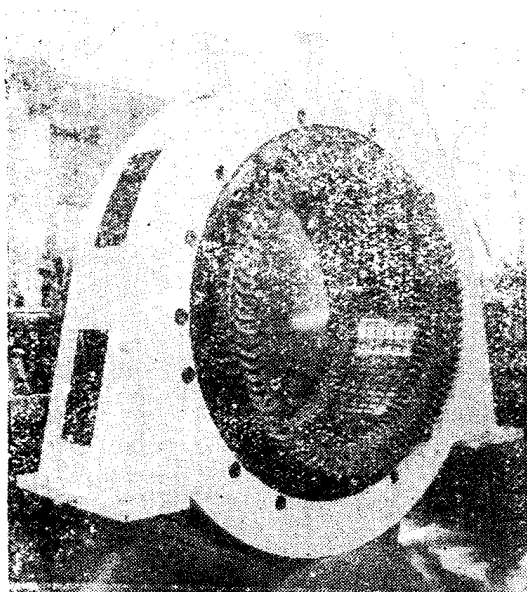


图 23-2 同步电机的定子

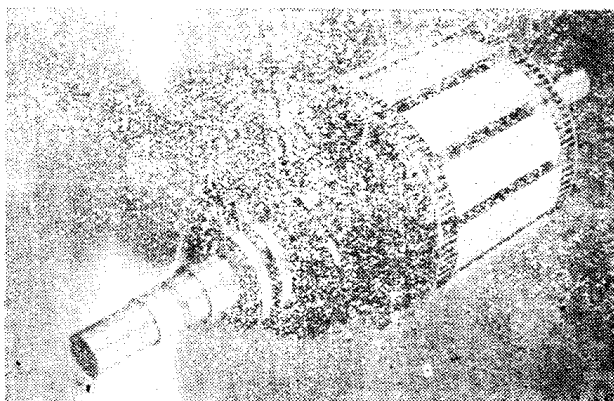


图 23-3 同步电机(凸极式)的转子

当电机的极数和转速一定时，定子绕组感应电动势的频率也一定。我国的工业标准频率为 50 Hz，因此同步发电机(synchronous generator)的转速与它的极数有固定的关系。例如 2 极电机的转速为 3000 r/min，4 极电机的转速为 1500 r/min，余类推。

如果转子通以直流励磁电流并被拖动到一定的转速后将定子绕组接于三相交流电源，则通入定子绕组的三相电流产生的旋转磁场的磁极就会带着转子磁极转动。电机就作为同步电动机(synchronous motor)运行。这时转子与旋转磁场间无相对运动，其转速与旋转磁场转速相同。

$$n = \frac{60 f}{p} \quad (23-3)$$

由上可见，无论是作发电机或电动机方式运行，电机的转速和频率及极数之间保持着严格的关系。由于转子总是和定子旋转磁场同步旋转，因此称为同步电机。

23.1.2 同步电机的用途

同步电机主要用作发电机。现在工农业生产所用的交流电能几乎都由同步发电机供给。大型同步电机用在大型电站，其单机容量在几十、几百以至一千MW以上，中小型同步发电机则广泛用于各种场合。

同步电机也常作为电动机用。由于它的功率因数可以通过调节励磁电源来调节，这样可利于电网的供电。又由于大容量的电机效率较高，所以大型同步电动机常被用于拖动大型水泵、离心压缩机、通风机、粉碎机等不要求调速的场合。作为动力用的小型同步电动机应用较少，过去只在要求恒速的小型动力机械上使用，例如电钟中就应用单相同步电动机；但近来在调频调速的系统中开始得到应用。

此外，同步电动机还可接于电网作同步补偿机(synchronous compensator)用。这时电机不带任何机械负载，靠调节转子中的励磁电流向电网发出所需的电感性或电容性无功功率，以达到改善电网功率因数或调节电网电压的目的。

23.2 同步电机的分类与基本结构

23.2.1 同步电机的分类

同步电机可按许多方法来分类。

如果按转子结构特点分,可分为凸极式和隐极式。这是同步电机的两种基本类型。凸极式同步电机(salient pole synchronous machine)的转子磁极很明显(见图 23-1 和图 23-3),磁极上有励磁绕组,相邻磁极的极性交替为 N 极和 S 极。大型低速同步电机都采用凸极式。由于这种电机的结构简单,中小型同步电机多半也采用凸极式。隐极式电机(non-salient pole machine)的示意图如图 23-4 所示。它的转子上没有明显突出的磁极,而是在外圆表面上开有数条槽,槽内放置励磁绕组,励磁绕组由同心式线圈组成。放励磁线圈的槽约占据整个圆周的三分之二左右。不开槽部分形成所谓六齿。隐极式结构可以使励磁绕组更好地固定和绝缘。这种电机主要用在容量大、转速高的场合。近年来,在中小型电机中也有采用隐极式结构的。

如果按拖动发电机的原动机来分,可以分为汽轮发电机(turbine-type alternating current generator or turbo-generator),水轮发电机(hydraulic turbine driven synchronous generator or water-wheel generator)和其它原动机带动的发电机等。在火力发电厂中,用汽轮机作为原动机,并与同步发电机直接耦合,整个机组称为汽轮发电机组。由于汽轮机在高速运行时较经济,所以汽轮发电机的转速都较高。我国生产的汽轮发电机大多数都是 2 极的,转速为 3000 r/min。汽轮发电机都采用隐极式结构,而且均为卧式(或称横轴式)。在水力发电厂中,用水轮机为原动机,它和同步发电机也是直接耦合,组成水轮发电机组。其转速比较低,一般为十几至数百 r/min,依水头高低和流量大小而定,因而水轮发电机的极数很多。水轮发电机都采用凸极式结构。大容量的水轮发电机大多为立式(竖轴式)。采用柴油机或汽油机作为原动机的发电机一般都是中小容量的。柴油机和汽油机的转速通常在 500~1500 r/min 之间。

如果按冷却方式来分类,可分为气体冷却和液体冷却。在水轮发电机及各种凸极同步电机里通常采用空气冷却。大型水轮发电机采用空气循环方式,冷却空气与外界空气隔绝,在机内有几个热交换器,当热空气与热交换器的冷水管接触时就把热量传给管中的冷水。汽轮发电机根据容量大小的不同,采用空气冷却、氢气冷却、水冷却等不同方式。当前,除了小容量(25 MW 以下)汽轮发电机采用空气冷却外,大于 50 MW 的汽轮发电机广泛采用氢、水或几种不同冷却介质分别冷却有关部件。我国生产的大容量(300 MW)汽轮发电机则采用了定、转子绕组双水内冷。图 23-5 是采用水内冷的同步电机定子绕组上接冷却水管的情况。双水内冷技术是我国首先成功应用的,这种电机定子线圈和转子线圈是采用不同长方形截面的空心铜管绕制而成,冷却水直接通过空心导线内孔。根据情况线圈混合采用空心、实心导体。

当然,还可以有其它分类方式。例如,可分为磁极固定在定子上的旋转电枢式同步电机(转子上嵌装三相交流绕组,经过转轴上的滑环及电刷与外电路接通)和磁极装在转子上的旋转磁场式同步电机。又例如若用永久磁铁磁极取代励磁绕组磁极,则形成了同步电机中的另一大类——永磁式同步电机。

不同类型的电机虽然各有不同的特点,各用于不同的工作条件或工作环境,但是它们的

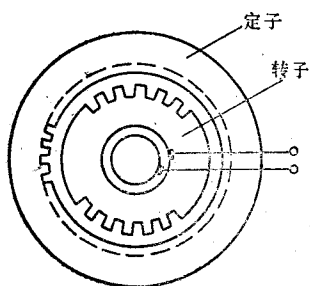


图 23-4 隐极式电机示意图

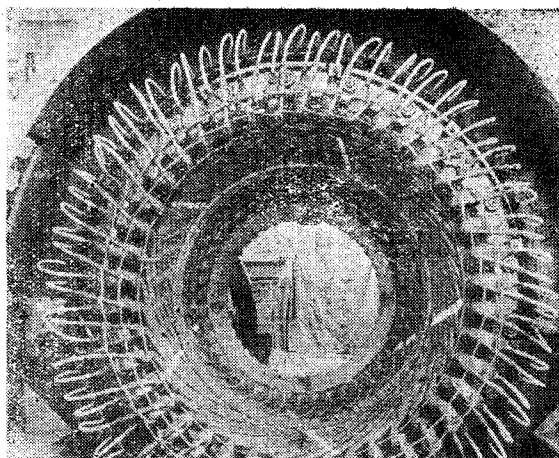


图 23-5 采用水内冷的同步电机定子绕组

工作原理是共同的。由于隐极式电机和凸极式电机的磁路有明显的区别，前者转子与定子间气隙沿圆周是均匀的（不考虑开槽口的影响），励磁绕组沿圆周是分布嵌入的；后者的两相邻磁极处的气隙比磁极中心处的气隙大得多，励磁绕组则是集中装在磁极上的，分析它们的运行性能所采用的方法也有所不同。通常是以汽轮发电机和水轮发电机为典型分别加以讨论的。

23.2.2 汽轮发电机的结构特点

1. 定子

大体上与异步电机相同。定子铁心由 0.35 或 0.5 mm 的电工钢片叠成。当定子外径大于 1 m 时，每层钢片由扇形片组成。铁心叠成后，在其两端用黄铜、反磁钢或硬铝制成的齿压板和定子铁心压圈压住齿部和定子铁心，再用螺杆拉紧以防止钢片松动或弹开，定子铁心通过其外圆的燕尾槽固定在定子机座上。在大型电机中，必须注意防止铁心振动传到机座引起厂房基础及其它设施的振动。有时，为了运输方便，还将定子分成两半，甚至几个部分，即采用所谓的分瓣定子，见图 23-6。

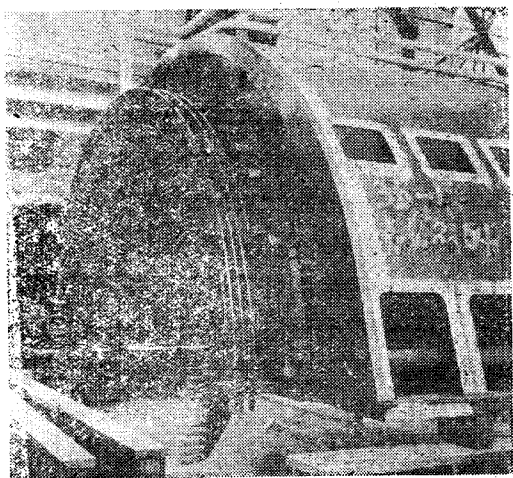
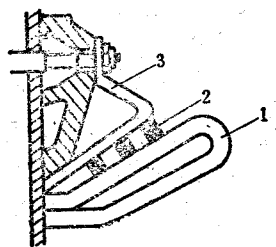


图 23-6 大型同步电机的分瓣定子

图 23-7 定子绕组端部的固定
1—绕组端部 2—箍环 3—托架

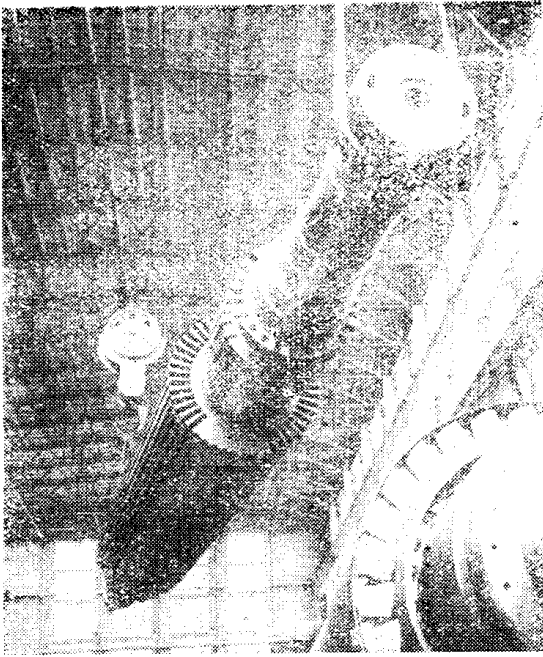


图 23-8 大型隐极式同步电机转子铁心

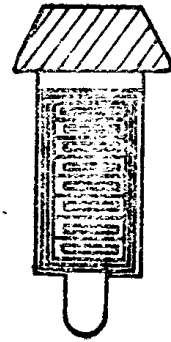


图 23-9 汽轮发电机转子槽形

定子机座主要用于固定铁心，常由钢板焊接而成。它必须有足够的强度和刚度，同时还必须满足通风散热的需要。铁心一般固定在机座内圆的筋上，铁心外圆与机座壁间留有空间作为通风道。

定子绕组的结构已在第 13 章中阐明。当定子绕组中电流较大时，要求导体有较大的截面积，为了减小集肤效应带来的附加损耗，定子线圈常用多股导线并绕，而且沿电机轴向在槽内进行适当的换位。汽轮发电机电压较高，定子绕组必须有足够的绝缘，其绝缘等级一般采用 B 级或 F 级。线圈的绝缘厚度由电机额定电压的高低来决定。

电机在正常运行时定子绕组会受到周期性电磁力作用而产生振动，振动力的大小与线圈中的电流平方成正比。如果不采取良好的固定措施，将导致绝缘损坏。尤其是在突然短路时，冲击电流可能比额定电流大十多倍，绕组端部可能因受巨大的电磁力作用而损坏，因此不仅在铁心槽内，而且在绕组端部也必须加以固定。通常在端部圆锥外表面套着几个箍环紧固，这些箍环由托架支撑固定，见图 23-7。

2. 转子

汽轮发电机的转速高达 3000 r/min，它的转子形如一个细长的圆柱体。转子在运转时由于本身的巨大重量和高速旋转时的离心力，将产生很大的机械应力，因此转子材料应有足够的机械强度。又由于转子是磁路的一部分，所以它还要有很好的导磁性能。在大容量汽轮发电机中，转子材料由含铬、镍和钼的特种合金钢制成。容量较小的汽轮发电机转子可用普通的含碳和硫较低的碳钢制成。转子大都用整块式的钢件与轴锻成一个整体，见图 23-8。在轴向，沿转子轴中心钻有中心孔，其用途是检查锻件质量，再则是消除锻钢内危险的内应力。

转子铁心表面圆周上铣有许多槽，励磁绕组嵌放在这些槽内。槽的排列形式大都为辐射式，大齿的中心线即为转子磁极的中心线。有时大齿上也开一些小槽，槽中不放线圈，只作通风用。为使下线方便并有利于保证绝缘质量，转子一般均为开口槽，有时在槽底也开有通风沟道，见图 23-9；也有将这种风沟开在槽的侧面。

励磁绕组为同心式绕组，用扁铜线绕制。转子绕组必须牢固地固定在槽内部分，用槽楔封住。槽楔必须有足够的机械强度，而且为减少槽漏磁，槽楔应是不导磁材料。此外，常常还希望槽楔能起阻尼绕组作用。所以，槽楔一般采用铝青铜或硬铝等合金材料制成。绕组的端部用护环和中心环来固定，见图 23-10 和图 23-11。护环是一个套在励磁绕组端部表面的

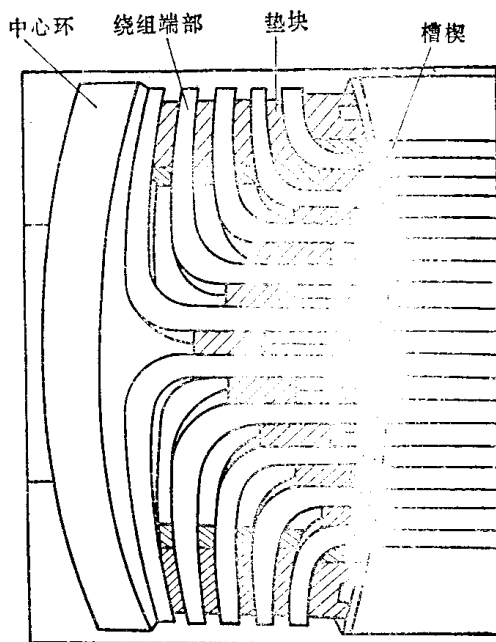


图 23-10 汽轮发电机励磁绕组的端部

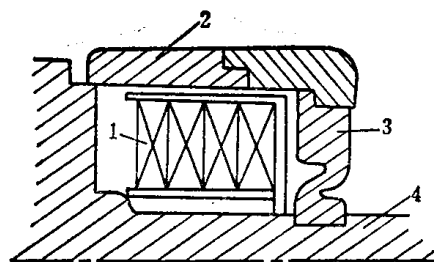


图 23-11 汽轮发电机转子护环和中心环
1—端接部分 2—护环 3—中心环 4—转子轴

圆环，其作用是保证绕组的端部不会因离心力而损坏。为了减小端部漏磁，护环采用非磁性的高强度合金钢制成。中心环是用来固定护环和防止励磁绕组轴向移动的。护环和中心环采用热套法固定在转轴上。

励磁绕组的引出线与滑环连接，通过电刷与直流电源相接。滑环一般位于轴承外侧，由铜或合金钢制成，套在轴上。滑环与轴之间用云母或玻璃胶木制成的绝缘筒绝缘。

转轴两端还装有供电机内部通风用的风扇，以利冷却。转子由轴承支撑，通常采用座式滑动轴承。国产 300 MW 汽轮发电机的转子如图 23-12 所示。

23.2.3 水轮发电机的结构特点

水轮发电机由水轮机带动。水轮发电机的特点是：极数多，直径大，轴向长度较短，整个转子为扁盘形，在外形上与汽轮发电机大不相同。

大多数水轮发电机为立式，转动部分的重量全部由一个推力轴承（thrust bearing）支撑。另有导轴承（guide bearing）保持转轴的中心位置。推力轴承是制造水轮发电机的一个关键部件。整个推力轴承浸在油中，运转时在轴承的运动部分与静止部分之间形成 0.07~0.1 mm 厚的油膜。

水轮发电机的转速是靠调节进水闸门来控制的，当发电机由于某种原因突然卸去负载时，转速将急剧上升，这时须及时关闭进水闸门。但为了避免产生过大的水冲击力，闸门不能关闭得太快，这就要求转子具有一定的转动惯量，从而使转子的升速时间加长，限制转速升高的速度。这样，水轮发电机的体积和单位容量的重量就远远超过汽轮发电机。

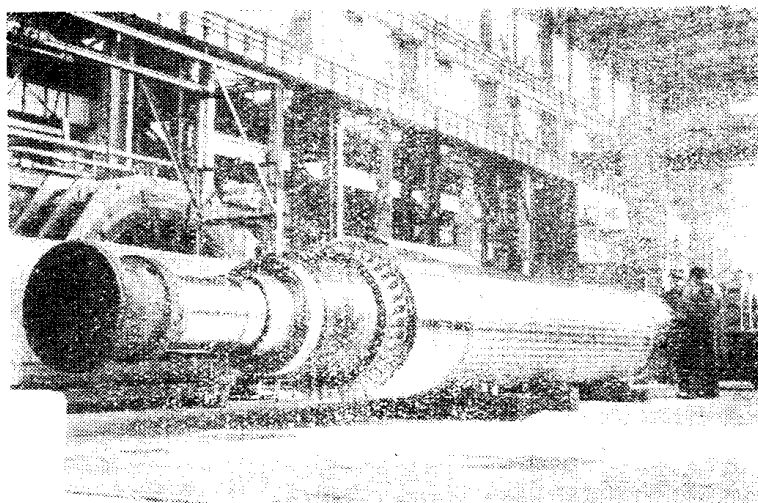


图 23-12 300 MW 汽轮发电机转子

从推力轴承所在位置来区分，立式水轮发电机可分为悬吊式和伞式两种，见图 23-13。

悬吊式中的推力轴承装在转子上部，整个转子悬着；伞式中的推力轴承装在转子下部。伞式电机在的优点是减小电机的轴向高度和缩短轴承支架（或称机架）跨距，轴向高度小了可降低厂房的高度、降低厂房造价。但是从电机机械稳定性看，悬吊式比伞式好，因此伞式结构只适用于低速的水轮发电机；当转速较高时，则以悬吊式为宜。

水轮发电机的直径很大，定子铁心由扇形电工钢片拼装叠成。为了散热的需要，定子铁心有径向风沟，沟的宽度一般为 1 cm。定子绕组一般均为波绕组，而且由于电机极数多，故大多采用分数槽绕组。

水轮发电机的转子磁极由厚度为 1~2 mm 的钢片叠成；磁极两端有磁极压板，用来压紧磁极冲片和固定磁极绕组。励磁绕组套于磁极上。在有些发电机中的极靴上开有一些槽，槽中放有铜条或黄铜条，各条的两端用端环连在一起组成阻尼笼（其作用后述），见图 23-3。

磁极固定在磁极轭上。大型水轮发电机的极轭由 4~6 mm 厚的钢板叠成。其构造是将钢板冲成扇形后拼叠成整体。中小型电机的极轭常由整块钢锻制成或由钢板叠成。

为了把磁极固定在磁极轭上，大型电机的磁极下部常制成 T 形或鸽尾形。轭部也有同样形状的槽，装配时用键固定，见图 23-14。中小型电机不用 T 形槽而用螺钉紧固。

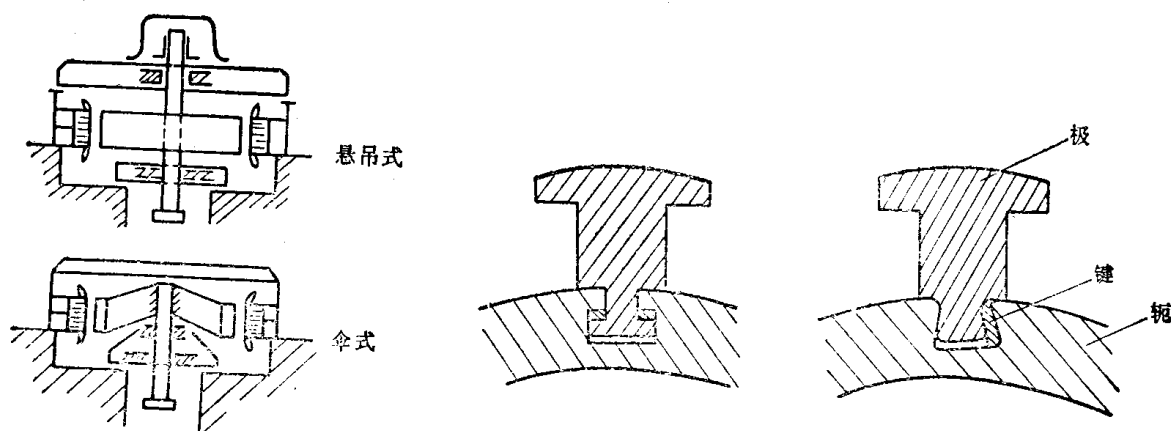


图 23-13 悬吊式和伞式结构示意图

图 23-14 T 形及鸽尾形槽

磁轭与轴之间通过转子支架相连。转子支架通常由轮臂和轮毂构成。大型电机中的轮臂多用钢板焊成，并用螺钉把轮臂固定在轮毂上，轮毂是紧套在转轴上的钢质圆筒。轮毂与轴之间用键来传递转矩。

为了保护推力轴承，在转子下面的机架上装有制动器。转子的转动惯量很大，在停机过程中转速由额定值至零经历的时间较长，在转子还没有停止转动时，由于推力轴承的轴瓦上的压力油膜就已消失而发生干摩擦会损坏轴瓦。因此在转速减低到一定程度时，要用制动器强制转子很快停下来。

此外，水轮发电机还有风叶和冷却装置等，这里不再详述。

安装在葛洲坝的 175 MW 水轮发电机的结构图见图 4-15。

习 题

23-1 同步电机的额定转速为什么是常数？其数值与哪些因数有关？若同步电机的 $n_N = 75 \text{ r/min}$ ， $f_N = 50 \text{ Hz}$ 极数为多少？

23-2 同步电机在结构上与异步电机有哪些异同之处？同步电机中隐极与凸极电机各有何特点？它们各适用于哪些场合？

23-3 为什么现代大容量同步电机都采用旋转磁极式？

23-4 为什么水轮发电机要用阻尼绕组？而汽轮发电机却不另行安装阻尼绕组？

23-5 为什么汽轮发电机通常采用整数槽的定子绕组，而低速的水轮发电机一般却采用分数槽绕组？

23-6 汽轮发电机的护环和中心环起什么作用？水轮发电机的推力轴承起什么作用？为什么它们都是很重要的关键部件？

23-7 伞式和悬吊式水轮发电机的结构特点是什么？

第 24 章 同步发电机的对称运行分析

24.1 空载运行分析

同步发电机空载运行是指发电机转子励磁绕组通以励磁电流并以同步速旋转时,定子绕组开路(不接负载)的情况。这时端电压等于绕组的感应电动势,电动势的波形决定于气隙磁通密度的空间分布波形和绕组的绕法。为了获得较近于正弦的电动势,应使气隙磁密的空间分布也尽可能为正弦形,由于凸极电机和隐极电机的转子磁路结构以及励磁绕组分布情况不同,所采用的处理方法也有所不同,下面分别介绍。

24.1.1 凸极同步发电机的空载气隙磁场

凸极电机的励磁绕组集中地套在极身上,由励磁绕组产生的磁通从一个极出来,经过气隙及定子分别进入两边相邻另一极性的磁极。磁力线的路径示意如图 24-1 所示。磁通大部分经过气隙进入定子,凡经过气隙同时匝链定子三相绕组和转子励磁绕组的磁通称为磁极主磁通,主磁通能在定子绕组中产生感应电动势。励磁磁势产生的磁通中另有一小部分不经过定子,而是直接由一个极至相邻的磁极形成闭路,称为磁极漏磁通。它不在定子绕组中产生感应电动势,但是会增加磁路和磁轭的饱和程度。

电机的空载气隙磁场就是指空载时主磁通在气隙中的分布情况。由于定、转子间的气隙沿整个圆周不均匀,极面下气隙小,而极间的气隙大,因此在圆周上各点的气隙磁阻也各不相同。极面下磁阻小,极间磁阻大而且在同一个极面下,气隙磁阻还与极靴的形状有关。因此,空载气隙磁通密度沿圆周的分布与一个极距范围内极弧占的比例以及极靴形状有关。不计定、转子开槽的影响时,在一个极的范围内定子气隙表面磁通密度的径向分量的分布近于平顶的帽形,极靴以外的气隙磁通密度减少很快,在相邻两极中性线上磁通密度为零,如图 24-2 中曲线 B_{δ} 所示。这个磁密分布曲线可以用谐波分析法分解出空间基波和一系列谐波。以下分析主磁通时都分析基波,每极基波磁通量用 Φ_0 表示。为了使气隙磁密尽可能接近正弦,通常使极靴的极弧半径小于定子内圆半径,而且两圆弧的圆心不重合。从而形成极弧中心处气隙最小,沿极弧中心线两侧方向气隙逐渐增大,这就可使气隙磁密分布更接近正弦形。

24.1.2 隐极同步发电机的空载气隙磁场

隐极电机的励磁绕组分布于转子各槽内,沿整个圆周定转子之间的气隙可视为是均匀的(不计槽开口的影响),因此气隙磁密分布与励磁绕组沿圆周的分布有关。在不同的圆周位置上,作用于经过气隙的定、转子磁回路上的励磁磁势是不同的,每隔一个槽就增加一个槽内的导体安匝,励磁磁势 F 在空间的分布为一阶梯形,见图 24-3 a。如果转子铁心出现饱和时,其中各个齿内的磁饱和程度不同,它们的磁压降也会不同,因此即使转子各槽有相同的安匝,气隙磁势(或气隙磁压降)曲线的各阶梯也可能是不等高的,靠近大齿的几个小齿中消耗的磁势多些,见图 24-3 b。如果认为磁力线垂直于定子表面通过气隙并忽略定子铁心

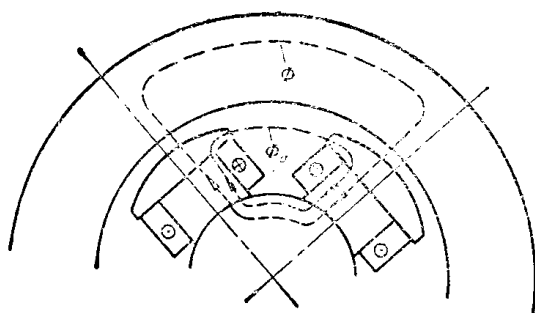


图 24-1 凸极同步电机的磁通路径示意图
Φ—主磁通 Φ₀—漏磁通

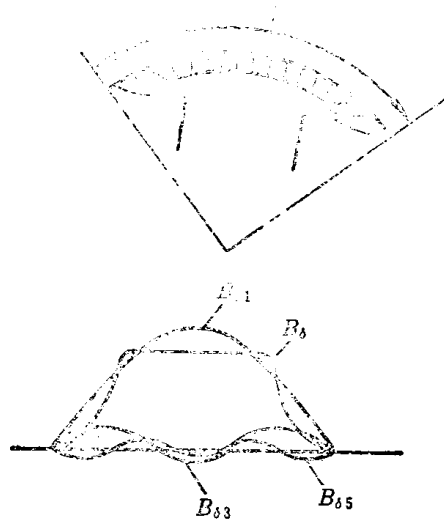


图 24-2 均匀气隙时凸极同步电机的气隙磁密分布

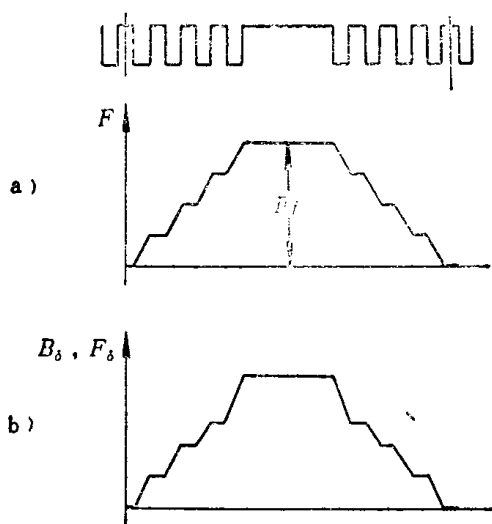


图 24-3 隐极同步电机的励磁磁势及气隙磁场的分布
a) 励磁磁势分布 b) 气隙磁密及磁势分布

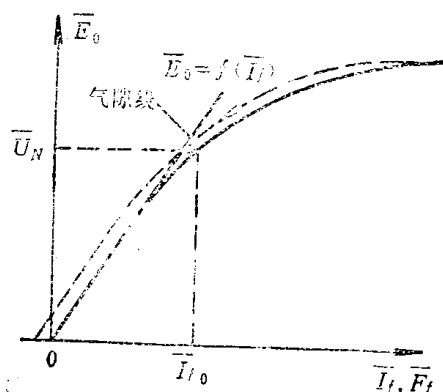


图 24-4 同步发电机的空载特性

的饱和影响，这曲线也表示沿定子圆周气隙磁通密度的分布。

对凸极同步电机同样可用谐波分析法从中分析出基波和各次谐波，空间基波磁密在定子绕组中产生基波频率感应电动势，每极基波磁通量（简称每极磁通量）也用 Φ_0 来表示。

24.1.3 同步发电机的空载特性

同步发电机磁极以同步速旋转时，电机内的气隙磁场也以同步速旋转，并切割定子绕组。定子绕组中产生的基波感应电动势 E_0 在数值上正比于每极磁通量 Φ_0 ， Φ_0 的大小决定于励磁绕组的磁势 F_f 或励磁电流 I_f 。电机空载时，端电压 $U_0 = E_0$ 。空载特性（Open-circuit characteristic）是指在额定转速时 U_0 与 I_f 之间的关系，也即 E_0 与 I_f 之间的关系，见图 24-4。

当 I_f 很小时，磁通 Φ_0 很小，电机磁路尚未饱和，铁心消耗的磁压降很小，转子磁势主要消耗于气隙中， E_0 与 I_f 变化的规律基本上是符合线性规律的。随着 I_f 的增大，铁磁材料出现饱和，铁心中的磁压降逐渐增大，空载特性开始弯曲。铁心饱和程度越增加，铁磁材

料中消耗的磁势也越多,这时即使大大增加励磁电流,但磁通量增加并不多,感应电动势也增大不多。为了合理地利用材料,空载电压等于额定电压时的运行点通常设计在空载特性刚开始弯曲的部分。

空载特性可以通过计算或实验得到。其实验测定方法如下:将励磁电流由最大值逐步减小,记取相应的空载电压。这样测得的曲线将和坐标轴交于原点左侧(图 24-4 虚线)。一般可将此曲线向右平移,直至曲线通过原点。这时的 $E_0 = f(I_f)$ 即为同步发电机的空载特性。通过零点与空载特性线相切的直线称为气隙线 (air gap line)。

实际运行时,空载状态的场合并不多,但是空载特性直观地把电机的励磁磁势与定子绕组中产生的感应电动势联系起来,体现着同步电机中感应电动势与励磁电流之间的联系。在研究和分析同步电机时,空载特性是不可缺少的重要特性。用标么值来表示空载特性时,可取额定相电压 U_N 为电压基值。并取 $E_0 = U_N$ 时的励磁电流 I_{f0} 为励磁电流基值。实践表明,不论电机的容量大小或电压高低,用标么值表示的空载特性都十分相近。下面列举一条典型的空载特性:

$\bar{I}_f$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
$\bar{E}_0$	0.58	1.0	1.21	1.33	1.40	1.46	1.51

新设计或制造出来的电机的空载特性可与这条空载特性进行比较,当二者相差大时,则可以认为磁路过于饱和或未充分利用。

24.2 隐极同步发电机的对称负载运行分析

这一节将分析发电机带有对称负载后的物理现象、发电机的电动势、端电压、相电流、功率因数和励磁电流之间的相互影响关系以及发电机作为单机运行的各种特性。

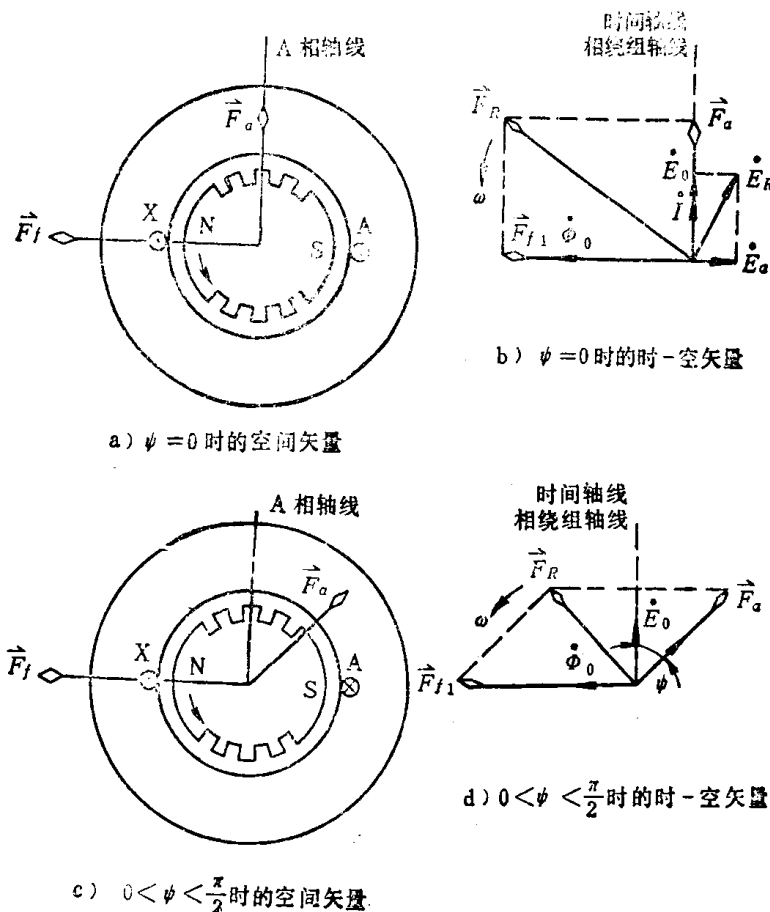
24.2.1 电枢反应的物理现象

当同步发电机空载运行时,电机中存在一个以额定转速旋转的励磁磁场。它是由转子励磁绕组的磁势产生的。当发电机接上负载后,电枢绕组中将有电流流过,负载对称时,电枢三相电流也对称。定子各相电流在定子漏磁路上产生漏磁通,它只与定子绕组本身匝链,不影响转子。同时,电枢三相电流共同合成的磁势(也称电枢磁势)作用于通过气隙的定、转子磁路(主磁路)上,使电机空载时的气隙磁场发生变化,这时电机内的气隙磁场是由励磁磁势和电枢磁势共同作用产生的。电枢磁势对励磁磁势的作用称为电枢反应 (armature reaction),这种作用一般是指它们的基波之间的作用。

如第 13 章所述,电枢三相绕组磁势是一个旋转磁势,若用 $\vec{F}_a$ 表示其基波磁势,则 $\vec{F}_a$ 的转速 n 与电流频率 f 之间有固定的关系: $n = \frac{60 f}{p}$ 。可见, $\vec{F}_a$ 与转子励磁磁势 F_f 在空间的转速相同、两者相对静止。这样,发电机带负载运行时,电枢磁势对励磁磁势有确定的影响。通过磁势叠加可得到负载时电机气隙空间实际存在的合成磁势的空间分布情况,然后分析在这个合成磁势的作用下电机绕组的感应电动势以及其它电磁关系。

现分别用 $\vec{F}_{f1}$ 和 $\vec{F}_a$ 表示励磁磁势空间分布的基波和电枢磁势基波,它们都是空间矢量。

当两者在空间有确定的相互位置时, 可以用矢量加法求出它们的合成矢量。 $\vec{F}_{f1}$ 的方位(即励磁磁势基波的幅值方位)与转子磁极轴线重合。在空载时, 当磁极轴线与某相(如 A 相)绕组轴线重合时, 与该相绕组匝链的基波励磁磁通 $\dot{\Phi}_0$ (是时间矢量)达到最大值。由于该相绕组中的感应电动势 $\dot{E}_0$ 在时间上落后该相磁通 $\dot{\Phi}_0$ 90° 电角度, 所以当此相绕组中的空载感应电动势 $\dot{E}_0$ 达到最大值时, 磁极已顺转向转过了 90° 空间电角度, 即超前了该相绕组轴线 90° 。为分析方便, 在作矢量图时把时间矢量图的坐标原点与空间矢量图的坐标原点重合在一起, 并且把时间矢量图的纵坐标与该相绕组的空间轴线重合, 同时把空间矢量旋转的正方向取得与时间矢量旋转的正方向相同, 即也是反时针方向为正, 见图 24-5。这种矢量图称为时间-空间矢量图, 简称时-空矢量图。使用时-空矢量图可以很简明地了解各量之间的关系。但应该注意, 时间矢量是针对一相绕组的电磁量而言的, 而空间矢量是针对整个电机气隙空间而言的。很明显, 在时-空图上 $\dot{\Phi}_0$ 与 $\vec{F}_{f1}$ 方向是重合的, 即 $\dot{\Phi}_0$ 与时间轴线的夹角等于磁极与 A 相绕组轴线的空间夹角(电角度), 见图 24-5 b。电机带负载时, 其电枢电流 $\dot{I}$ 与绕组内的感应电动势 $\dot{E}_0$ 之间将有一定的夹角, 这个角称为内功率因数角, 用 ψ 表示。负载的



- a) $\psi = 0$ 时的空间矢量
 b) $\psi = 0$ 时的时-空矢量
 c) $0 < \psi < \frac{\pi}{2}$ 时的空间矢量
 d) $0 < \psi < \frac{\pi}{2}$ 时的时-空矢量

图 24-5 电枢反应