

电机学

DIAN JI XUE

朱东起
王岩 编
李发海

下

中央广播电视大学出版社

电机学

下册

朱东起 王岩 李发海 编

*

中央广播电视大学出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷二厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 17 千字 424

1987年10月第1版 1987年10月第1次印刷

印数 1—12000

定价 3.00 元

ISBN 7-304-00007-4/TM·5

内 容 简 介

《电机学》下册包括同步电机、异步电机和直流电机三部分。本书详细阐述了同步发电机对称运行时的基本电磁关系,运行特性、参数测定;分析了同步发电机并联运行时的有功和无功调节;介绍了同步发电机的不对称运行及突然短路。本书对异步电机的原理、电磁关系、机械特性、起动及调速进行了阐述,并对直流发电机的原理、直流电动机的原理、机械特性、起动和调速进行了介绍。本书供发电专业、电机专业的大专院校学生及有关技术人员使用。

目 录

第三篇 同步电机

第十一章 同步发电机的基本电磁关系	(2)
§ 11-1 同步电机的用途、基本类型与结构、型号与额定值	(2)
§ 11-2 同步发电机的无载运行、磁势空间向量与电势时间向量	(6)
§ 11-3 对称负载时的电枢反应	(14)
§ 11-4 隐极电机的磁势电势向量图和电势向量图	(17)
§ 11-5 凸极机的双反应理论、电势向量图	(30)
§ 11-6 电压变化率及负载下励磁磁势的求法	(37)
思考题	(40)
习 题	(40)
第十二章 同步发电机的运行特性	(45)
§ 12-1 同步发电机的无载运行特性曲线、短路特性曲线和同步电抗的测定	(45)
§ 12-2 同步发电机的零功率因数负载特性曲线及普梯电抗的测定	(49)
§ 12-3 同步发电机的外特性和调整特性	(51)
§ 12-4 转差法和取出转子法求参数	(52)
思考题	(56)
习 题	(57)
第十三章 同步发电机的并联运行	(60)
§ 13-1 并联运行的条件和方法	(61)
§ 13-2 同步发电机并联运行时的基本电磁关系、功率和转矩方程式	(65)
§ 13-3 有功功率的调节和静态稳定	(71)
§ 13-4 无功功率的调节和U形曲线	(79)
思考题	(82)
习 题	(83)
第十四章 同步电动机和同步补偿机	(85)
§ 14-1 同步电动机的运行原理	(85)
§ 14-2 同步电动机的起动	(95)
§ 14-3 反应式同步电动机	(97)
§ 14-4 同步补偿机	(97)
思考题	(100)
习 题	(100)
第十五章 同步发电机的不对称运行	(103)
§ 15-1 各相序的基本方程式和等值电路	(103)
§ 15-2 几种不对称稳态短路的分析	(107)

§ 15-3 负序和零序参数的测定	(112)
§ 15-4 不对称运行与电机的关系	(113)
思考题	(114)
习 题	(114)
第十六章 同步发电机的突然短路	(115)
§ 16-1 超导体闭合回路磁链守恒概念	(115)
§ 16-2 同步发电机无载时三相突然短路的分析	(117)
§ 16-3 瞬变参数的实验测定、电机结构对参数的影响	(126)
§ 16-4 突然短路对同步电机及电力系统的影响	(128)
思考题	(130)
习 题	(130)
第十七章 同步电机的振荡	(131)
§ 17-1 振荡的物理概念	(131)
§ 17-2 同步电机在振荡过程中转矩平衡方程式	(133)
§ 17-3 同步电机的自由振荡和强制振荡	(135)
§ 17-4 动态稳定概念	(136)
思考题	(137)
习 题	(137)

第四篇 异步电机

第十八章 概述	(139)
§ 18-1 三相异步电动机的用途、基本类型、主要结构部件、额定值与型号	(139)
§ 18-2 三相异步电动机的基本工作原理及转差率	(144)
思考题	(146)
第十九章 三相异步电动机的运行原理	(147)
§ 19-1 定子绕组接在三相对称电源上, 转子不转 ($n=0$) 的情况	(147)
§ 19-2 三相异步电动机转子旋转时的电磁关系	(158)
§ 19-3 鼠笼转子的极数、相数和参数的折合	(168)
思考题	(170)
习 题	(171)
第二十章 三相异步电动机的功率、转矩和运行性能	(172)
§ 20-1 三相异步电动机的功率传递及转矩等式	(172)
§ 20-2 三相异步电动机的机械特性	(176)
§ 20-3 电磁转矩的实用公式	(181)
§ 20-4 三相异步电动机的工作特性	(183)
§ 20-5 三相异步电动机的参数测定	(185)
思考题	(187)
习 题	(187)
第二十一章 三相异步电动机的起动与调速	(189)
§ 21-1 三相异步电动机的起动	(189)

§ 21-2 具有较高最初起动转矩的鼠笼异步电动机	(192)
§ 21-3 三相异步电动机的转速调节	(193)
思考题	(196)

第五篇 直流电机

第二十二章 概述	(198)
§ 22-1 直流电机的用途及基本工作原理	(198)
§ 22-2 直流电机的主要结构与型号	(200)
思考题	(207)
第二十三章 直流电机的磁路、电枢绕组	(208)
§ 23-1 直流电机的磁路、空载时气隙磁通密度的分布波形与空载磁化特性	(208)
§ 23-2 直流电机的电枢绕组	(215)
§ 23-3 电枢电势与电磁转矩的计算	(220)
思考题	(222)
习 题	(223)
第二十四章 直流发电机	(224)
§ 24-1 直流电机的电枢反应	(224)
§ 24-2 直流发电机稳态运行时的基本方程式及功率关系	(227)
§ 24-3 直流发电机的运行特性	(231)
思考题	(235)
习 题	(236)
第二十五章 直流电动机	(237)
§ 25-1 直流电动机的基本运行原理	(237)
§ 25-2 直流电动机的工作特性和机械特性	(241)
§ 25-3 直流电动机的起动	(247)
§ 25-4 直流电动机的调速	(249)
§ 25-5 直流电动机的电磁制动	(252)
思考题	(256)
习 题	(257)
第二十六章 直流电机的换向	(259)
§ 26-1 直流电机的换向过程	(259)
§ 26-2 改善换向的措施	(262)
思考题	(263)
习题答案	(265)

第三篇 同步电机

同步电机是电机学的一个重要内容。

本篇首先介绍同步电机的用途,汽轮发电机、水轮发电机、中小型同步电机的简单结构,我国生产同步电机主要的几个系列。

因为同步电机主要用做发电机,故在本篇各章中,重点放在发电机部分。由于发电机和电动机虽然各有其特点,但在运行中有其共同的基本规律和可逆的关系。在掌握了发电机的性能后,电动机的运行性能是可以很快掌握的。

同步电机作为发电机运行时,首先的问题是如何能发电。在第二篇介绍交流电机感应电势和电枢磁势的基础上,第十一、十二章将对同步电机带三相对称负载稳态运行时的电机内部电磁关系进行综合研究,它是分析同步电机的重要理论基础。第十一章中首先介绍同步发电机的无载运行,引出励磁磁势空间向量和电枢绕组电势时间向量。当发电机带上负载后,电枢绕组的电流会在电机内产生另一个磁势即所谓电枢反应磁势。电枢反应磁势对励磁磁势的作用将对同步电机的运行性能起重要影响。同步电机的时间、空间向量图是分析同步电机内部电磁关系的主要分析工具,必须熟练掌握各种向量图的作法及根据向量图进行特性计算。同步电抗是同步电机的主要参数,将着重阐明各种电抗的物理意义并了解其数值范围。第十二章将介绍同步发电机的各种运行特性及参数的实验求法。

同步电机的主要运行方式是接在大电网上运行,第十三章将介绍同步电机并联运行的条件和方法;并联后如何调节发电机的有功功率和无功功率;为了保证可靠地稳定并联运行,如何保持电机的静态稳定。

第十四章将重点分析同步电动机的问题。介绍同步电机的可逆原理,两种惯例下的向量图。将从物理概念入手,叙述同步电动机起动中的问题及起动方法。最后简单介绍同步补偿机。

同步电机有时会遇到非对称运行或非稳态运行的情况。第十五章将介绍同步发电机的不对称运行问题。当同步发电机带上不对称负载时,对电机和用户都可能带来某些不利的影响。本章重点是如何用对称分量法来分析不对称问题及不对称运行对电机的影响。同步发电机在运行时,有时会发生线路上或机端的突然短路故障。这时会出现很大的冲击电流,产生很大的电磁力,以致损坏电机。在第十六章中将要分析突然短路时产生电流冲击的原因及后果。重点放在阐述物理概念,而不作严格的数学分析。在十五、十六章中将会引出有关的电机参数如:负序电抗、零序电抗、瞬变电抗、超瞬变电抗等,要很好掌握它们的物理意义、数值范围及测定方法。

对同步电机的振荡问题将作简要介绍,了解振荡的物理过程,自由振荡和强制振荡的区别,列出基本方程式。

第十一章 同步发电机的基本电磁关系

§ 11-1 同步电机的用途、基本类型与结构、型号与额定值

一、同步电机的用途

同步电机主要用来作为发电机运行。现代社会中使用的交流电能，几乎全由同步发电机产生。

同步电机还可作为电动机使用，对不要求调速的大功率生产机械，常用同步电动机来驱动。同步电动机可以通过调节励磁电流来改善电网的功率因数。

此外，同步电机还可以作为同步补偿机使用，它实际上是一台接在交流电网上空转的同步电动机，能够专门向电网发出感性或容性的无功功率，满足电网对无功功率的要求。

同步电机一般在定子上放置电枢绕组，在转子上装了磁极，磁极上套励磁绕组（如用永久磁极做成磁极，就不用励磁绕组了）。当作为发电机运行时，励磁绕组中通入直流电流，电机内部产生磁场，由原动机拖动电机的转子旋转，磁场与定子导体之间有了相对运动，在定子绕组中就感应出交流电势来。交流电势的频率 f 决定于极对数 p 和转子的转速 n ，即

$$f = \frac{pn}{60} \text{ Hz}$$

式中转速的单位用 r/min 。由式可以看出，当电机的极对数和转速一定时，发出交流电势的频率也是固定的。我国的电力系统，规定交流电流的频率为 50 Hz 。因此，当电机为一对极时，电机的转速必定是 3000 r/min ；电机为二对极时，电机的转速必定是 1500 r/min ，依此类推。

如果作为同步电动机运行时，必须在电机的定子绕组加上三相交流电。三相交流电流流过定子绕组，会在电机里产生旋转磁场。转子的励磁绕组通入直流电后，转子好象是磁铁。于是，旋转磁场带动磁铁转动，转子的转速为

$$n = \frac{60f}{p} \text{ r/min}$$

由此可见，同步电机无论作为发电机，或是作为电动机，当电机极对数一定时，它的转速 n 和频率 f 之间有严格的关系，用电机专业的术语说，就是同步。同步电机的词意就是由此而来的。

各种同步电机都是由定子、转子两个基本部分组成的。转子部分是由转子铁心、励磁绕组、滑环和转轴等组成。定子部分是由定子铁心、定子电枢绕组组成。

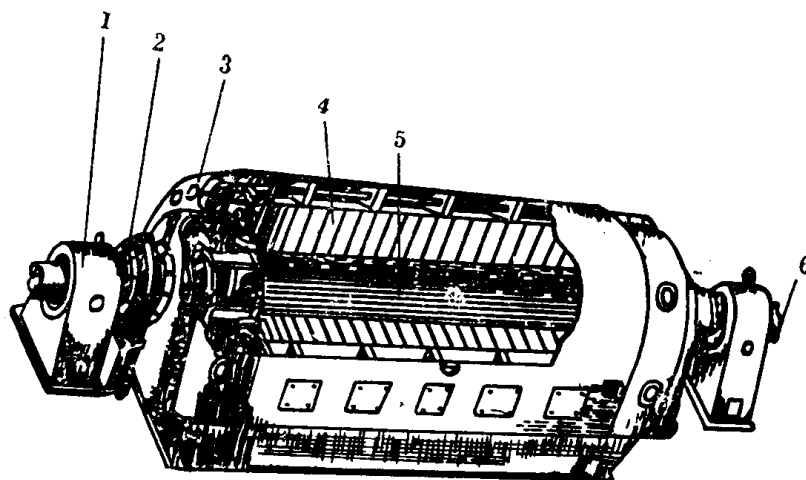
对于大、中型同步发电机，由于驱动发电机的原动机不同，常可分为汽轮发电机和水轮发电机，它们的结构有较大的差异。一般中小型同步电机可以作为发电机、电动机或补偿机运行，从

结构上看,它们之间差别不大。以下简单介绍一下汽轮发电机、水轮发电机以及中小型同步电机的结构。

二、汽轮发电机

图 11-1 是一台汽轮发电机,它是由定子、转子等部分组成。

汽轮发电机由于转速较高(一般都是 3000 r/min),为了很好地固定励磁绕组,一般都作成隐极式转子。隐极式转子从外形来看,没有明显凸出的磁极,见图 11-1。当在它的励磁绕组里通入直流电流,转子同样能产生N极和S极的磁场。由于转速高,为避免产生过大的离心力,对转子直径有一定的限制。为了增大容量,只能增加转子的长度,因此汽轮发电机的转子是一个细而长的圆柱体。



1—轴承座; 2—出水支座; 3—端盖; 4—定子; 5—转子; 6—进水口

图 11-1

对于转子铁心,要求它的导磁性能好,一般由高机械强度和导磁较好的合金钢锻成,并且和转轴做成一个整体。图 11-2 是汽轮发电机转子装配图。转子铁心上开了槽,有一部分表面上开的槽较多,那里的齿较窄,叫小齿。在另外的一部分没有开槽,形成了大齿。一般汽轮发电机都作成一对磁极,转子上只有二个大齿。在转子槽里放上励磁绕组,励磁绕组通入直流电,就在两个大齿上形成一个N极和一个S极,大齿的中心线就是磁极的中心。

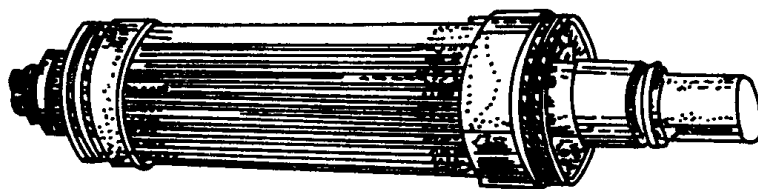


图 11-2

励磁绕组是用扁铜线绕成同心式线圈,放到槽里去。由于转速高,离心力大,励磁绕组的固定是个很重要的问题。在槽里的导体用槽楔来压紧,端部的导体要用护环来固定。励磁绕组通过装在转子上的集电环与电刷装置才能和外面的直流电源构成回路。

定子是由导磁的定子铁心和导电的定子绕组,以及固定铁心和绕组用的一些部件组成的。这些部件是机座、铁心压板、绕组支架等。为了减少定子铁心里的铁损耗,定子铁心是由 0.5 mm

厚的硅钢片迭装而成。当定子铁心外径大于 1 m 时, 用扇形的硅钢片来拼成一个整圆。在迭装时, 把每层的接缝错开。在扇形片的表面上涂上绝缘漆, 以减少铁心的涡流损耗。定子铁心内圆开有槽, 槽内放置定子绕组。定子绕组一般都作成开口槽, 便于嵌线, 如图 11-3 所示。

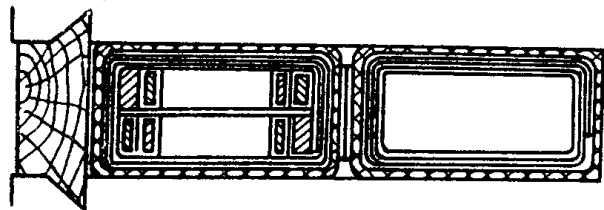


图 11-3

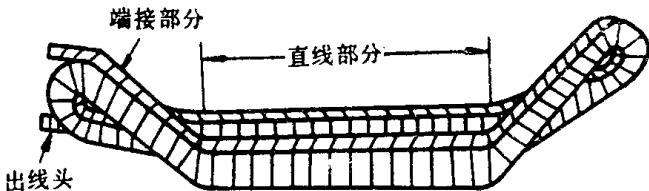


图 11-4

定子绕组是由许多线圈联接而成, 每个线圈又是由多股铜线绕制成的。内冷却电机的每股导线做成空心的, 可在中间通入冷却介质, 大大增加了冷却效果。线圈的形状如图 11-4 所示。

绕制多股线圈时, 为了减少集肤效应引起的附加损耗, 在这些股线之间需要进行换位, 换位一般在线圈的直线部分进行。

放在定子槽里的导体是靠槽楔来压紧固定, 端接部分用支架固定。

机座的作用是为了固定定子铁心, 因此要求它应有足够的机械强度和刚度, 以承受加工、运输以及运行过程中的各种作用力。一般汽轮发电机的机座是由钢板拼焊而成。

三、水轮发电机

由水轮机带动的同步发电机叫水轮发电机。由于水轮机的转速较低 (一般每分钟只有几十转到几百转), 因此把发电机的转子作成凸极式的。因为凸极式的转子, 在结构上和加工工艺上都比隐极式的简单。

水轮发电机是立式结构, 转子部分必须支撑在一个推力轴承上。推力轴承要承担整个机组转动部分的重量和水的压力, 这些向下的压力有时达几百吨甚至几千吨重。因此大容量水轮发电机, 必须很好地解决推力轴承的结构和工艺, 以及推力轴承安放的位置等问题。从推力轴承安放的位置, 立式水轮发电机可以分为悬吊式和伞式两种不同的结构。图 11-5 是它们的示意图。

悬吊式是把推力轴承放在转子的上部, 整个转子都悬挂在推力轴承之上, 见图 11-5(a), 伞式是把推力轴承放在转子的下部, 见图 11-5(b)。目前这两种结构都使用, 悬吊式稳定性好, 用在转速高的水轮发电机里; 伞式轴向长度小, 可以降低厂房的高度, 用于低速水轮发电机里。立式水轮发电机中, 除了推力轴承外, 还装有导轴承, 在悬吊式机组里, 一般装有两个导轴承; 在伞式机组里, 只装一个。装导轴承的目的是为了保持机组运行稳定。

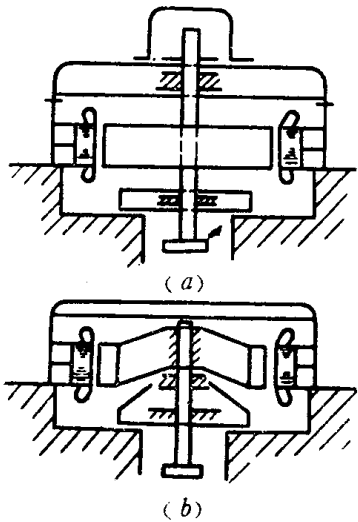


图 11-5

水轮发电机的转子是由磁轭、磁极、励磁线圈、转子支架、转轴等组成。

磁极用 1~1.5 mm 厚的钢板冲成磁极冲片,用铆钉装成一体。磁极上套有励磁线圈,而励磁线圈是由扁铜线绕制而成的。

磁极的极靴上还有阻尼绕组。阻尼绕组是由一根根的裸铜条,放入极靴的阻尼槽中,然后在两端面用铜环焊在一起,形成一个短接的回路,如图 11-6。

磁极固定在磁轭上,磁极的下部可以作成图 11-6 所示的 T 尾,或者是鸽尾形。轭部冲成同样形状的槽,装配时,两者用铁块撑紧固定。在小型电机里,磁极尾部也可用螺钉和轭部相固紧。磁轭通过转子支架与轴联接。

有的水轮发电机由于直径很大,为了便于运输,把定子铁心连同机座一起分成数瓣,把分瓣的定子运到工地后,再拼成一个整圆定子。

为了保护推力轴承,在转子下面的机架上装有制动器。它的作用是在电机停机过程中,当转速较低时,推力轴承中轴瓦上不能形成油膜,为了避免干摩擦,损坏轴瓦,当转速低到一定程度时,用制动器很快地把转子停下来。

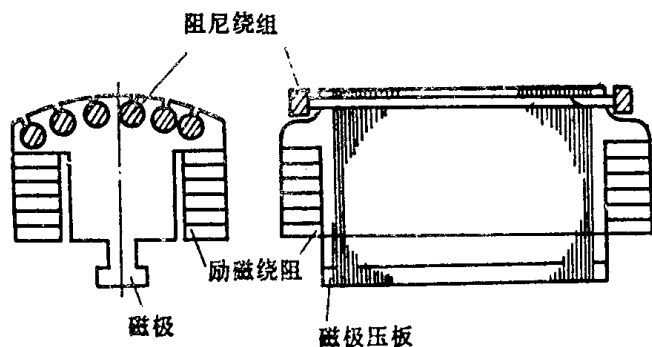


图 11-6



图 11-7

四、中小型同步电机

中小型同步电机,指容量在几十、几百、到几千千瓦的同步电机。中小型同步电机多作成卧式的,定子铁心也是由硅钢片迭装成的,当铁心外径小于 1 m 时,用整圆冲片;大于 1 m 时,用扇形片。

定子槽形根据容量和电压大小的不同而不一样。大容量高电压多用开口槽;小容量低电压多用半闭口槽,如图 11-7 所示。用半闭口槽时,线圈由几根圆导体并绕而成。嵌线时,把圆导体一根一根地从槽口塞下去,最后经过浸漆处理,增加绝缘强度和导热性。

中小型电机的转子多作成凸极式的。励磁绕组除几十千瓦以下的,都采用扁铜线扁绕而成。

在容量较大的电机里,磁轭仍用钢板冲成的扇形片叠成,在小容量或高速电机里,多用铸钢铸成。

只有几个千瓦的同步电机,有时把磁极放在定子上,电枢绕组放在转子上,用三个滑环把三相交流电从转子引出来,叫做转枢式同步电机。它的优点是可以提高硅钢片的有效利用率,并把定子磁轭和机座合二为一,以节省钢材。

中小容量同步电机的转子有两种支承方法：一种是座式轴承，一种是端盖轴承。轴承可以用滑动轴承与滚动轴承。

五、我国生产的同步电机的型号和额定值

我国生产的汽轮发电机有 QFQ、QFN、QFS 等系列。前两个字母 QF 表示汽轮发电机；第三个字母表示冷却方式：Q 是氢外冷、N 是氢内冷、S 是双水内冷。

我国生产的大型水轮发电机是 TS 系列，T 表示同步、S 表示水轮。

此外，中小型同步发电机有 TF 系列、T 系列、T₂ 系列，它们是由内燃机、柴油机等原动机带动的，容量可以从几千瓦到几千千瓦。同步电动机有 TD、TDL 等系列，它们主要驱动风机、水泵、空气压缩机等，容量从几百千瓦到上万千瓦。同步补偿机有 TT 系列，容量从几千千伏安到几万千伏安。上述型号中 T 表示同步电机，第二个字母 F 表示发电机，D 表示电动机，T 表示调相机。

现将我国生产的双水内冷汽轮发电机部分技术数据列表如表 11-1。

表 11-1

型号	视在功率 (kVA)	有功功率 (kW)	电压 (V)	电流 (A)	转速 (rpm)	功率因数	频率 (Hz)	效率 (%)
QFS—50—2	62500	50000	10500	3440	3000	0.8	50	98.2
QFS—60—2	75000	60000	10500	4125	3000	0.8	50	98.1
QFS—125—2	147000	125000	13800	6150	3000	0.85	50	98.3
QFS—300—2	353000	300000	18000	11320	3000	0.85	50	98.45

下面介绍电机的铭牌。

- 1) 电机的型号；
- 2) 额定功率 $P_N(\text{kW})$ ；
- 3) 额定电压 $U_N(\text{V})$ ；
- 4) 额定电流 $I_N(\text{A})$ ；
- 5) 额定转速 $n_N(\text{rpm})$ ；
- 6) 额定功率因数 $\cos \varphi_N$ ；
- 7) 励磁电压 $U_f(\text{V})$ 和励磁电流 $i_f(\text{A})$ ；
- 8) 额定温升($^{\circ}\text{C}$)。

§ 11-2 同步发电机的无载运行、磁势空间向量与电势时间向量

研究同步发电机稳态运行时的内部电磁关系是了解同步电机各种运行情况的理论基础。当原动机把同步发电机拖动到额定转速后，如果在发电机的励磁绕组里通入励磁电流时，就会在气隙里产生磁通。电枢绕组切割气隙磁通，产生了对称的三相电势。这个电势称为发电机的无载

电势,用 E_0 表示。本节将讨论同步发电机在无载运行时的基本电磁关系。首先研究转子励磁磁势的空间分布,引出转子磁势空间向量,找出电机气隙中的磁密分布波形,引出气隙磁密向量,进而讨论定子绕组中感应电势的时间向量,并找到感应电势时间向量与磁势空间向量的关系,最后得到发电机的无载特性曲线,它反映了无载电势 E_0 和励磁电流 i_f 之间的数量关系。

1. 基波励磁磁势

同步发电机的励磁绕组通常在转子上,当励磁绕组中通入直流电流后,产生的励磁磁势随转子一起转动,从定子上看,它也是一个旋转磁势,可以用前面分析电枢绕组磁势同样的方法来分析。以凸极同步电机为例,图 11-8(a)是一个凸极同步电机的示意图。转子上的励磁绕组中通入一个直流电流 i_f ,一对磁极的匝数为 W_f 。定子上用三个集中绕组来代表实际的三相分布绕组,集中线圈的匝数等于分布绕组的有效匝数 W_{f1} ,图中画出了各相绕组感应电势的正方向。为了作图方便,把气隙圆周展开成直线,定子在下面,转子在上面,如图 11-8(b)所示。仍把直角

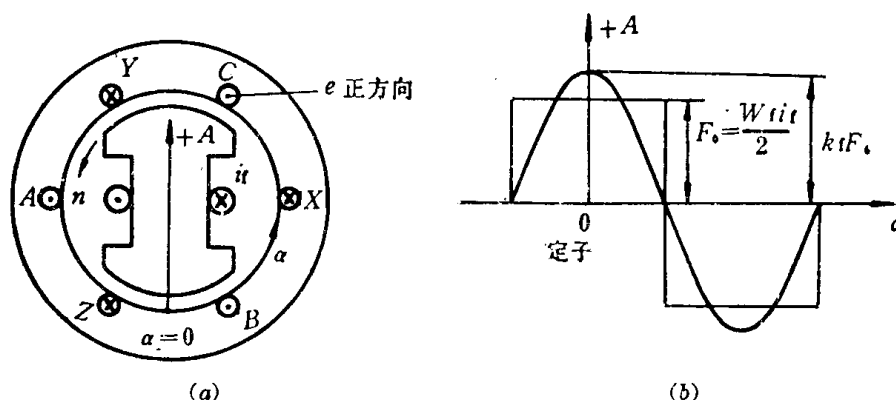


图 11-8

坐标系放在定子的内表面上,横坐标表示沿圆周方向的空间距离,用电角度 α 表示,选线圈 AX 的轴线处作为坐标原点,磁势从定子到转子作为磁势正方向。转子励磁绕组产生的气隙磁势就画在图 11-8(b)上,它是一个矩形波,每极磁势的幅值为 $F_0 = \frac{1}{2} W_f i_f$ (单位是 A)。可以通过

富氏级数分解为基波、谐波,其基波磁势的幅值为 $F_{01} = \frac{4}{\pi} F_0 = k_f F_0$ 。系数 k_f 叫做励磁磁势波

形系数,它的意义是 $k_f = \frac{\text{励磁磁势基波幅值}}{\text{励磁磁势最大值}}$ 。对于凸极机, $k_f = \frac{4}{\pi}$ 。在上述规定的正方向下,励磁磁势基波正幅值的位置通常位于转子 S 极中心对应的气隙处,在画图瞬间,正好与 A 相轴线重合,即在 $\alpha=0$ 的地方,当然它将随着转子一道,以同步转速顺 α 正方向旋转。

隐极同步发电机转子励磁绕组的安排,如图 11-9(a)。励磁绕组放在磁极两边的槽里,为了使得励磁磁势的波形能够接近正弦形,在磁极的中间部分不放绕组。在实际电机中,中间这部分一般不开槽,形成了所谓的大齿;有时也开一些小槽,主要为了改善电机的冷却性能。转子的其余部分开了槽,并在槽中放入线圈。在图 11-9 中放了 $11', 22', 33', 44'$ 四个线圈。将它们串联起来组成整个励磁绕组。

励磁绕组中通入直流电后,励磁磁势沿气隙空间分布波形是图 11-9(b)所示的阶梯波,它的

最大值 F_0 为

$$F_0 = \frac{1}{2} i_f W_f$$

利用富氏级数,把这个阶梯形磁势的基波分出来,其幅值为 $k_f F_0$ 。下面介绍系数 k_f 的计算方法。从图 11-9(a)的励磁绕组可看出,这是一个同心式绕组,由于绕组产生的磁势只决定于绕组安匝的分布情况,与导体串联的次序无关,因此这个励磁绕组也可以看成由四个整距线圈 14', 23', 32', 41' 串联组成,这就成为一个整距、分布绕组了。绕组总的基波磁势由上述四个整距线圈产生的基波磁势合成,每个线圈产生的矩形波磁势可分解出基波磁势,基波磁势幅值要乘上系数 $\frac{4}{\pi}$,四个线圈产生的四个基波磁势在空间互相隔开一个电角度 α ,产生总的基波磁势时要乘上一个分布系数 k_{wf} 。所以隐极电机的励磁磁势波形系数为

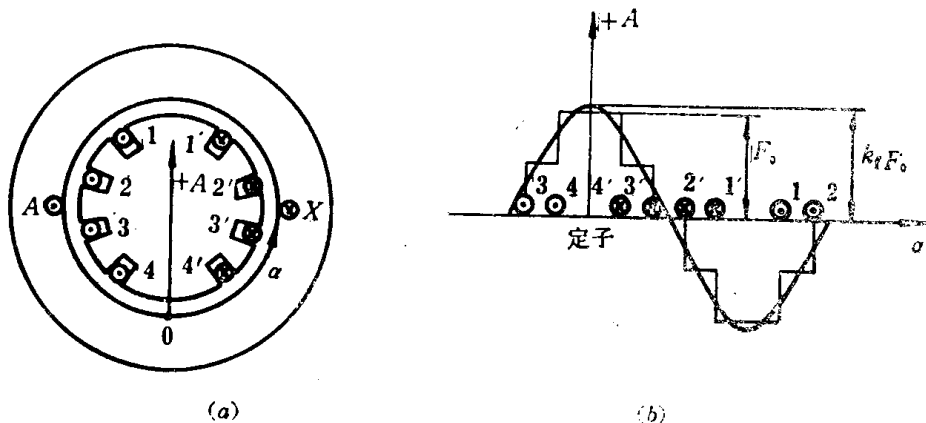


图 11-9

$$k_f = \frac{4}{\pi} k_{wf}$$

下面来求 k_{wf} ,在图 11-9(a)里,用 Z'_2 代表转子槽的分度数,所谓分度数,就是假想沿转子表面都开成等距离的槽,这些槽的总数就是 Z'_2 。用 Z_2 代表转子上实际开出的总槽数, p 代表极对数。于是相邻两个槽之间空间电角度 α 和每极下的槽数 q 为

$$\alpha = \frac{2p\pi}{Z'_2}$$

$$q = \frac{Z_2}{2p}$$

根据电枢绕组磁势求分布系数的公式可知励磁绕组的分布系数

$$k_{wf} = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{Z_2}{2p} \frac{2p\pi}{2Z'_2}}{\frac{Z_2}{2p} \sin \frac{2p\pi}{2Z'_2}} = \frac{2p \sin \frac{Z_2}{Z'_2} \frac{\pi}{2}}{Z_2 \sin \frac{p\pi}{Z'_2}}$$

如果把图 11-9(b)的阶梯波磁势近似看成梯形波磁势, $\sin \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$, 上述公式可简化为

$$k_{wf} = \frac{\sin \frac{Z_2}{Z'_2} \frac{\pi}{2}}{\frac{Z_2}{Z'_2} \frac{\pi}{2}}$$

系数

$$k_f = \frac{4}{\pi} \frac{\sin \frac{Z_2}{Z'_2} \frac{\pi}{2}}{\frac{Z_2}{Z'_2} \frac{\pi}{2}}$$

k_f 的大小与转子槽数有关,但实际上与比值 $\gamma = \frac{Z_2}{Z'_2}$ 的关系更密切,当这个比值 γ 给定后, k_f 的近似数值就可从表 11-2 中找出。

隐极电机励磁磁势波形系数

表 11-2

γ	0.6	0.66	0.7	0.75	0.8
k_f	1.09	1.06	1.03	1	0.965

从表中可以看出,当 $\gamma = 0.75$ 时, k_f 的数值近于 1,也就是说,励磁磁势波形是比较接近于正弦波的,汽轮发电机的励磁绕组一般也就按 $\gamma = 0.67 \sim 0.8$ 这样的比值范围来设计的。为了分析问题方便,隐极同步机的励磁绕组也用等值的集中整距线圈代替,等值线圈匝数为 $k_{wf} F_0$ 。如图 11-10(a) 表示。图 11-10(b) 是励磁磁势基波的波形图,它随转子以同步速在空间旋转。

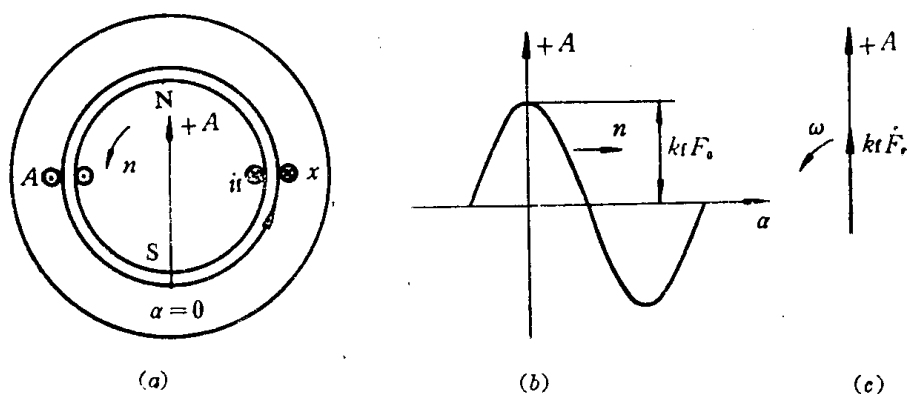


图 11-10

例 11-1

有一台 3000 r/min 的汽轮发电机的转子,它的两个大齿占整个圆周的 $\frac{1}{3}$ 。其余部分均匀开了 20 个小槽,每个小槽里放 10 根导体,所有导体串联起来组成励磁绕组。当通入的励磁直流电流为 100 A 时,求系数 k_f 及基波励磁磁势的幅值 $k_f F_0$ 各为多大?

解: 把励磁绕组看成由空间分布开的 10 个整距线圈串联而成。实际槽数为 $Z_2 = 20$ 。它占 $\frac{3}{2}$ 圆周,所以分度数 $Z'_2 = 30$ 。

$$\alpha = \frac{2p \times 360^\circ}{Z_2'} = \frac{360^\circ}{30} = 12^\circ$$

$$q = \frac{Z_2}{2p} = \frac{20}{2} = 10$$

励磁绕组的分布系数为

$$k_{wf} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{10 \times 12^\circ}{2}}{10 \sin 6^\circ} = 0.8285$$

$$k_f = \frac{4}{\pi} k_{wf} = 1.055$$

励磁绕组的串联匝数为 $W_f = 10 \times 10 = 100$ 匝, 通入直流电流为 $i_f = 100$ A, 所以, 基波励磁磁势幅值为

$$\begin{aligned} F_{01} &= K_f F_0 = \frac{1}{2} K_f W_f I_f \\ &= \frac{1}{2} \times 1.055 \times 100 \times 100 = 5275 \text{ A} \end{aligned}$$

2. 基波磁势空间向量

上面分析了转子励磁绕组产生的励磁磁势, 其中最主要的也是最有用的量是幅值为 $k_f F_0$ 的基波励磁磁势分布波, 它随转子一起旋转, 转速也是同步速 n 。这是一个旋转磁势, 可用空间向量 $k_f \vec{F}_0$ 来表示。空间参考轴仍选在定子 A 相绕组轴线 +A 处, 该处为 $\alpha = 0$ 。根据空间向量的画法, 向量长度等于基波磁势的幅值 $k_f F_0$, 向量位置放在基波磁势正幅值的地方, 向量以同步电角速度 ω 逆时针方向转动。以图 11-10(a) 表示的隐极机为例, 画出励磁磁势的基波空间向量图, 如图 11-10(c) 所示。因为图 11-10(a) 表示的瞬间, 转子轴线恰好与定子 +A 轴重合, 转子的初始位置 (亦即 S 极中心在坐标轴 α 上的位置) 为 $\alpha_0 = 0$, 所以空间向量 $k_f \vec{F}_0$ 在这个瞬间是和 +A 轴重合的, 但它以同步电角速度 ω 向逆时针方向转动。

例 11-2

已知一台凸极同步电机转子以同步速 n 旋转, 转子绕组每对极匝数为 W_f , 转子绕组中通入直流电流 i_f , 励磁磁势波形系数为 k_f , 在图 11-11(a) 所示瞬间, 转子初始位置 (S 极中心在坐标

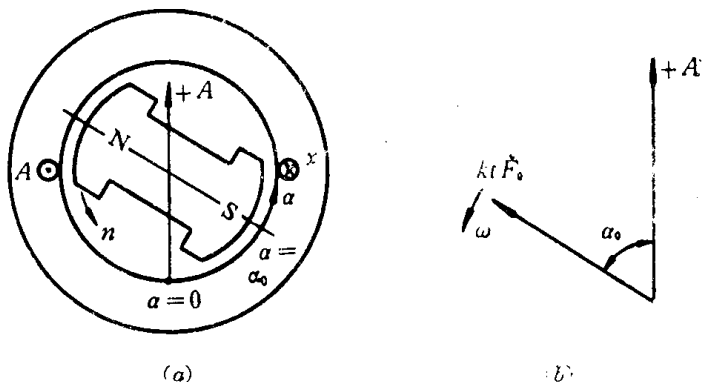


图 11-11

轴 α 上位置) 为 $\alpha_0 = 60^\circ$, 在空间向量图上作出基波励磁磁势空间向量 $k_f \dot{F}_0$ 。

解: 根据已经给定的数据可以算出励磁磁势基波幅值大小, $k_f F_0 = \frac{4}{\pi} \times \frac{1}{2} W_f i_f$, 在图 11-11

(a) 所示瞬间, 基波励磁磁势幅值在空间坐标轴 α 上的位置是 $\alpha_0 = 60^\circ$ 处, 因此在图 11-11(b) 中, 可在逆时针方向离 $+A$ 轴 $\alpha_0 = 60^\circ$ 的地方, 画出励磁磁势基波空间向量 $k_f \dot{F}_0$, 它以同步电角速度 ω 逆时针方向旋转。

3. 基波气隙磁密空间向量 $\dot{B}_0$

基波励磁磁势会在气隙中产生磁密波, 在隐极机中, 气隙均匀, 当铁心不饱和时, 气隙磁密与磁势成正比, 基波磁势产生了正弦波磁密, 在不考虑磁铁的磁滞涡流效应下, 磁密波的相位和磁势波的相位也相同, 如图 11-12(a) 所示, 一个正弦分布的磁密波也可以用空间向量 $\dot{B}_0$ 表示, 如图 11-12(b) 所示。

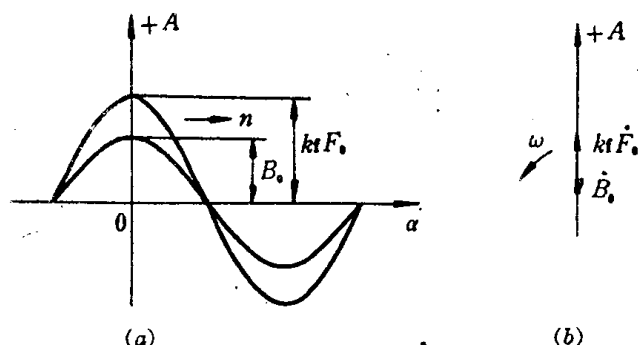


图 11-12

在凸极电机中, 由于电机中气隙不均匀, 即使铁心不饱和, 气隙中产生的磁密大小与磁势大小也不成正比, 基波励磁磁势在气隙中产生的磁密波是非正弦分布。磁密波还要分出基波和高次谐波, 基波磁密和基波磁势也不一定同相位。凸极机的这一特殊性还将在后面专门分析。

4. 定子绕组一相的感应电势, 时间向量 $\dot{E}_0$

气隙磁密切割定子绕组, 会在定子绕组中感应电势, 当转子以同步转速 n 转动, 正弦波磁密切割每相定子绕组产生的电势大小随时间作正弦变化, 一相感应电势可以用时间向量来表示。由于空间坐标是选择 A 相绕组轴线 $+A$ 为参考轴, 时间向量也分析 A 相的量, A 相感应电势的有效值用 E_0 表示, 时间向量用 $\dot{E}_0$ 表示。对于隐极电机, 根据 $\omega t = 0$ 时转子的位置, 可以找到这一瞬时感应电势 $\dot{E}_0$ 在时间向量图上的相位, 我们先看转子的两个特殊初始位置。图 11-13(a) 表示

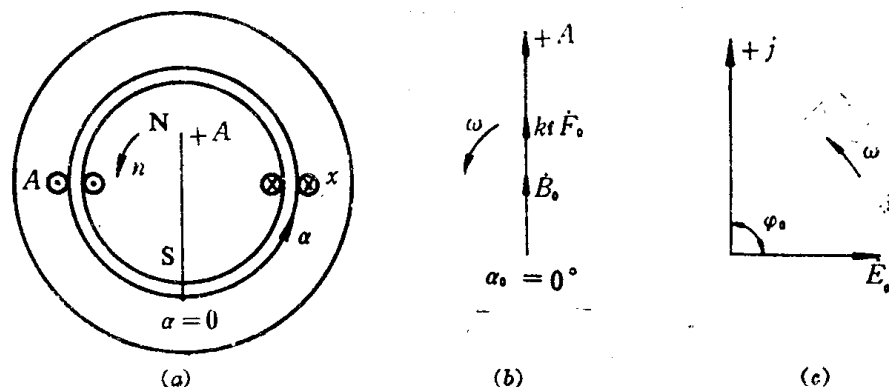


图 11-13