

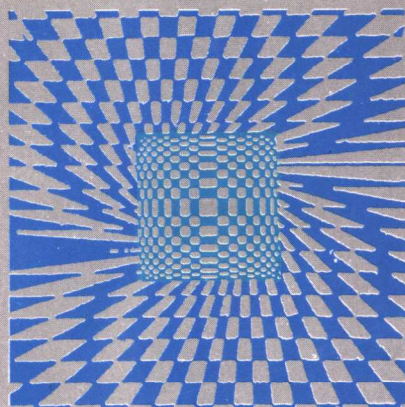


中央广播电视大学教材

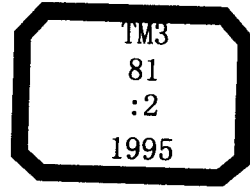
电机学 下册

DIANJI XUE

朱东起 主编



中央广播电视大学出版社



电 机 学

下 册

朱东起 主编

中央广播电视大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电机学 下册 / 朱东起主编. —北京:中央广播电视大学出版社, 1995. 5

ISBN 7-304-01160-2

I. 电… II. 朱… III. 电机学 - 电视大学 - 教材
IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 08588 号

电 机 学

下 册

朱东起 主编

出版·发行:中央广播电视大学出版社

电话:发行部:010-68519502 总编室:010-68182524

网址:<http://www.crtvup.com.cn>

地址:北京市海淀区西四环中路 45 号

邮编:100039

经销:新华书店北京发行所

印刷:北京密云胶印厂

印数:34001-38000

版本:1995 年 2 月第 1 版

2005 年 8 月第 8 次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:15.25 字数:347 千字

书号:ISBN 7-304-01160-2/TM·30

定价:17.10 元

(如有缺页或倒装,本社负责退换)

目 录

第四篇 同步电机

第十六章 同步发电机的基本电磁关系	(2)
§ 16-1 同步电机的用途、基本类型与结构、型号与额定值	(2)
§ 16-2 同步发电机的空载运行 磁动势空间向量与电动势时间相量	(7)
§ 16-3 对称负载时的电枢反应	(14)
§ 16-4 隐极电机的磁动势电动势向量图和电动势相量图	(18)
§ 16-5 凸极机的双反应理论 电动势相量图	(30)
§ 16-6 电压变化率及负载下励磁磁动势的求法	(37)
思考题	(40)
习 题	(40)
第十七章 同步发电机的运行特性	(45)
§ 17-1 同步发电机的空载特性、短路特性和同步电抗的测定	(45)
§ 17-2 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)
* § 17-3 同步发电机的外特性和调整特性	(52)
§ 17-4 转差法和取出转子法求参数	(53)
思考题	(57)
习 题	(57)
第十八章 同步发电机的并联运行	(60)
§ 18-1 并联合闸的条件和方法	(61)
§ 18-2 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)
§ 18-3 有功功率的调节和静态稳定	(70)
§ 18-4 无功功率的调节和 U 形曲线	(79)
思考题	(82)
习 题	(83)
第十九章 同步电动机和同步补偿机	(85)
§ 19-1 同步电动机的运行原理	(85)
* § 19-2 同步电动机的起动	(96)
§ 19-3 同步补偿机	(97)
思考题	(100)

习 题.....	(100)
第二十章 其它用途的同步电机.....	(103)
§ 20-1 永磁式同步电机.....	(103)
§ 20-2 感应子式发电机.....	(108)
§ 20-3 磁阻式同步电机.....	(110)
第二十一章 同步发电机的不对称运行.....	(115)
§ 21-1 不对称运行的相序方程式和等值电路.....	(115)
§ 21-2 几种不对称稳态短路的分析.....	(119)
§ 21-3 负序和零序参数的测定.....	(124)
* § 21-4 不对称运行对同步电机的影响.....	(125)
思考题.....	(126)
习 题.....	(127)
第二十二章 同步发电机的突然短路.....	(128)
§ 22-1 超导体闭合回路磁链守恒概念.....	(128)
§ 22-2 三相突然短路的物理分析 短路电流及时间常数.....	(130)
§ 22-3 瞬变电抗和超瞬变电抗的测定方法.....	(140)
* § 22-4 突然短路对同步电机及电力系统的影响.....	(142)
思考题.....	(143)
习 题.....	(143)
第二十三章 同步电机的振荡.....	(144)
§ 23-1 振荡的物理概念.....	(144)
§ 23-2 动态转矩平衡方程式.....	(146)
§ 23-3 自由振荡和强制振荡.....	(148)
* § 23-4 动态稳定概念.....	(149)
思考题.....	(150)
习 题.....	(150)
第二十四章 大型同步发电机的损耗、发热、冷却与冷却方式.....	(151)
§ 24-1 交流电机的损耗和效率.....	(151)
§ 24-2 大型同步发电机的发热与冷却.....	(155)
§ 24-3 大型汽轮发电机的冷却方式.....	(157)
思考题.....	(162)
习 题.....	(163)

第五篇 异步电机

第二十五章 概述	(164)
§ 25-1 异步电机的用途和基本类型	(164)
§ 25-2 异步电动机的主要结构	(165)
§ 25-3 异步电动机的额定值与型号	(168)
§ 25-4 三相异步电动机的基本工作原理	(169)
思考题	(170)
第二十六章 三相异步电动机的运行原理	(172)
§ 26-1 三相异步电动机转子不转、转子绕组开路时的电磁关系	(172)
§ 26-2 三相异步电动机转子堵住不转、转子绕组短路时的电磁关系	(176)
§ 26-3 三相异步电动机转子旋转时的电磁关系	(181)
§ 26-4 鼠笼式三相异步电动机转子绕组折合	(189)
思考题	(192)
习 题	(192)
第二十七章 三相异步电动机的功率、转矩和运行特性	(194)
§ 27-1 三相异步电动机的功率传递与转矩平衡	(194)
§ 27-2 三相异步电动机的机械特性	(197)
§ 27-3 三相异步电动机的工作特性	(204)
§ 27-4 三相异步电动机参数的测定	(205)
思考题	(207)
习 题	(208)
第二十八章 三相异步电动机的起动、调速与制动	(210)
§ 28-1 三相异步电动机的起动	(210)
§ 28-2 三相异步电动机的转速调节	(217)
§ 28-3 三相异步电动机的制动	(223)
§ 28-4 三相异步发电机	(225)
思考题	(228)
习 题	(229)
第二十九章 单相异步电动机	(230)
§ 29-1 单相异步电动机的工作原理	(230)
§ 29-2 单相异步电动机的类型	(231)
思考题	(235)

第四篇 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,我国生产同步电机的主要几个系列。

因为同步电机主要用作发电机,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,要搞清发电机的运行特性和能量转换规律。在第三篇介绍交流电机感应电动势和电枢磁动势的基础上,第十六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,引出时空向量图作为重要分析工具,介绍各种向量图的作法及根据向量图进行特性计算。第十七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,第十八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。

第十九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。为扩大知识面,第二十章将介绍其它用途的同步电机,它们是磁阻式同步电机、永磁式同步电机及感应子式发电机。

同步电机有时会遇到非对称运行或非稳态运行的情况,第二十一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。在第二十二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。在这两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。

第二十三章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。第二十四章将对大型同步发电机的发热问题、冷却方式以及电机的温升作概要介绍。

第十六章 同步发电机的基本电磁关系

本章在介绍同步电机的用途、基本类型与结构后,先介绍同步发电机的空载运行,引出励磁磁动势空间向量和电枢绕组电动势时间相量。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动势即所谓电枢反应磁动势。电枢反应磁动势对励磁磁动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,必须熟练掌握向量图的作法并能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,本章将着重阐明各种电抗的意义并了解其数值范围。

§ 16-1 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。

近十多年来,由于电力电子技术的发展,将变频器和同步电动机联合起来,组成了无换向器电动机,它没有直流电机的机械换向器,用电子换向来代替,可以得到与直流电机同样的性能,而且可以做到比直流电机容量更大,电压和转速更高,在工业上开辟了新的用途。

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(如用永久磁铁做成磁极,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动势来。交流电动势的频率 f 决定于极对数 p 和转子的转速 n ,即

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

式中,频率单位为 Hz,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 50Hz。因此,当电机为一对极时,电机的转速必定是 3000r/min; 电机为二对极时,电机的转速必定是 1500r/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,转子好像是磁铁。于是,

旋转磁场带动磁铁转动,转子的转速(单位为 r/min)为

$$n = \frac{60f}{p}$$

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。

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 16-1 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 3000r/min),为了很好地固定励磁绕组,一般都做成隐极式转子。隐极式转子从外形看,没有明显凸出的磁极,见图 16-1。当在它的励磁绕组里通入直流电流时,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。

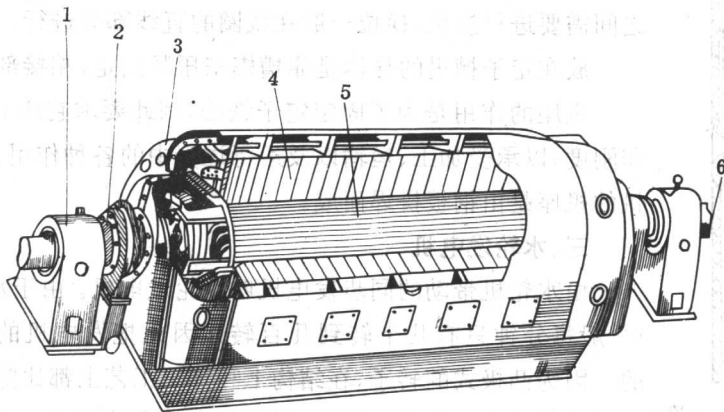


图 16-1 汽轮发电机

1—轴承座 2—出水支座 3—端盖
4—定子 5—转子 6—进水口

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 16-2 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中心。

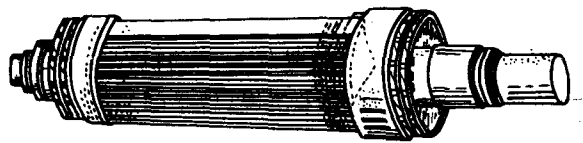


图 16-2 汽轮发电机转子

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0.5mm厚的硅钢片叠装而成。当定子铁心外径大于1m时,用扇形的硅钢片来拼成一个整圆。在叠装时,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。定子绕组一般都做成开口槽,便于嵌线,如图16-3所示。

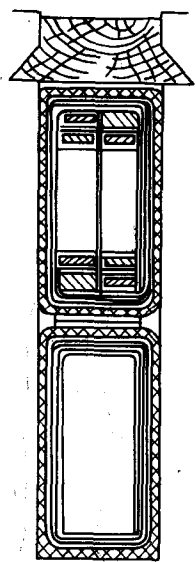


图 16-3 定子开口槽

定子绕组是由许多线圈连接而成,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16-4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做成凸极式的。因为凸极式的转子,在结构上和加工工艺上都比较简单。

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

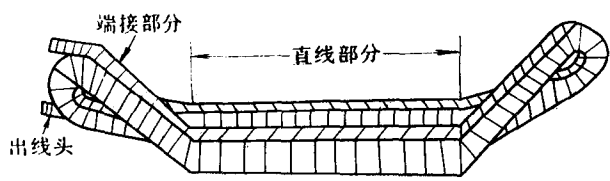


图 16-4 定子线圈

力轴承要承担整个机组转动部分的重力和水的压力,这些向下的压力有时达几千牛顿甚至几万牛顿。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。由于推力轴承安放的位置不同,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 16-5 是它们的示意图。

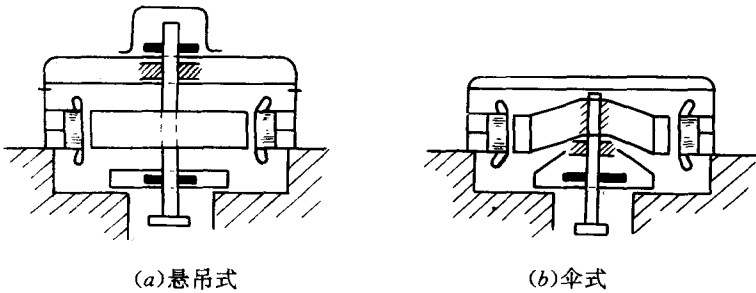


图 16-5 立式水轮发电机

悬吊式的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 16-5(a),伞式的是把推力轴承放在转子的下部,见图 16-5(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。

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 1~1.5mm 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,然后在两端用铜环焊在一起,形成一个短接的回路,如图 16-6。

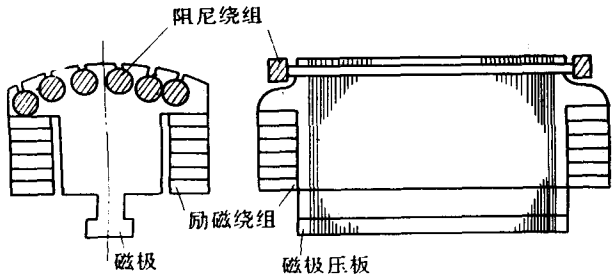


图 16-6 转子磁极

磁极固定在磁轭上,磁极的下部可以做成图 16-6 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紧固。磁轭通过转子支架与轴连接。

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。

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。中小型同步电机多做成卧式的,定子铁心也是由硅钢片叠装成的,当铁心外径小于 1m 时,用整圆冲片;大于 1m 时,用扇形片。

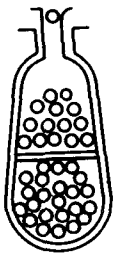


图 16-7 中小型同步电机定子槽

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 16-7 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、 T_2 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,容量从几千伏安到几万伏安。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(第二个)表示调相机。

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 $n_N(\text{r/min})$;

- 6)额定功率因数 $\cos\varphi_N$;
- 7)励磁电压 $U_f(V)$ 和励磁电流 $i_f(A)$;
- 8)额定温升($^{\circ}C$)。

现将我国生产的几种汽轮发电机技术数据列表如下(见表16-1)。

表 16-1 汽轮发电机技术数据表

型 号	视在功率 (kVA)	有功功率 (kW)	电压 (V)	电流 (A)	转速 (r/min)	功率因数	频率 (Hz)
QFQ-50-2	62500	50000	10500	3440	3000	0.8	50
QFN-100-2	112600	100000	10500	6475	3000	0.85	50
QFSN-200-2	235000	200000	15750	8625	3000	0.85	50
QFSN-300-2	353000	300000	20000	10190	3000	0.85	50
QFSN-600-2	667000	600000	20000	19245	3000	0.9	50

§ 16-2 同步发电机的空载运行 磁动势 空间向量与电动势时间相量

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动势。定子绕组开路,不接负载的情况称为同步发电机的空载运行。空载时的电枢绕组感应电动势称为发电机的空载电动势 E_0 ,这时 E_0 就等于定子的端电压 U 。

本节将讨论同步发电机在空载运行时的基本电磁关系。首先研究转子励磁磁动势的空间分布,引出转子磁动势空间向量,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动势的时间相量,并找到感应电动势时间相量和磁动势空间向量的关系,最后得到发电机的空载特性曲线,它反映了空载电动势 E_0 和励磁电流 i_f 之间的数量关系。

一、基波励磁磁动势

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,产生的磁动势简称励磁磁动势,随转子一起转动,从定子上看,它也是一个旋转磁动势,可以用前面分析电枢绕组磁动势同样的方法来分析。

先分析凸极同步电机,图 16-8(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 ,它将在电机内部产生磁场。定子上用三个集中线圈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_1k_{dp1} ,图中画出了各相绕组感应电动势的正方向。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 16-8(b)所示。仍把直角坐标系建立在定子的内表面上,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,即 $\alpha=0$ 处。规定磁动势从定子到转子作为磁动势正方向。由于转子励磁绕组产生一对极的磁动势为 $W_f i_f$,它在每个气隙上的磁动势是 $\frac{1}{2} W_f i_f$ 。当 α 为 $-\frac{\pi}{2}$ 到 $+\frac{\pi}{2}$,气隙磁动势方向是出定子进转子,气隙磁动势为 $+\frac{1}{2} W_f i_f$,

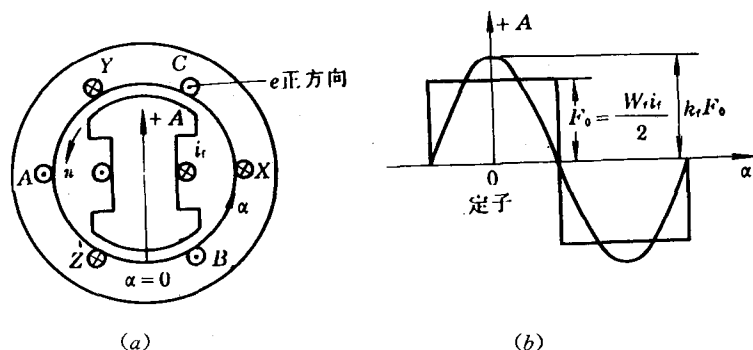


图 16-8 凸极电机的励磁磁动势

当 α 为 $+\frac{\pi}{2}$ 到 $+\frac{3\pi}{2}$, 气隙磁动势方向是出转子进定子, 气隙磁动势为 $-\frac{1}{2}W_t i_t$ 。励磁绕组产生的气隙磁动势波形就画在图 16-8(b) 上, 它是一个矩形波, 图中的 $F_0 = \frac{1}{2}W_t i_t$ 表示了每极磁动势的幅值。

可以通过傅里叶级数将矩形波磁动势分解为基波及谐波, 其基波磁动势的幅值为 $F_{01} = \frac{4}{\pi}F_0 = k_f F_0$, 系数 k_f 叫做励磁磁动势波形系数, 它的意义是

$$k_f = \frac{\text{励磁磁动势基波幅值}}{\text{励磁磁动势最大值}}$$

对于凸极同步电机, $k_f = \frac{4}{\pi}$ 。在上述规定的正方向下, 励磁磁动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, 在画图的瞬间, 正好与 A 相轴线重合, 即在 $\alpha=0$ 的地方, 当然它随着转子一道, 以同步转速 n 顺着 α 正方向旋转。

隐极同步发电机转子励磁绕组的安排, 如图 16-9(a)。励磁绕组放在磁极两边的槽里, 为了使得励磁磁动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 16-9 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, 励磁磁动势沿电机圆周方向的分布波形是图 16-9(b) 所示的阶梯波, 它的最大值 F_0 为

$$F_0 = \frac{1}{2}i_t W_t$$

利用傅里叶级数, 把这个阶梯形磁动势的基波分出来, 其幅值为 $k_f F_0$, 下面说明隐极电机的励磁磁动势波形系数 k_f 。

在图 16-9(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 代表转子上实际具有的总槽数。令系数 $\gamma = \frac{Z_2}{Z'_2}$, k_f 的大小与系数 γ 有关。当 γ 已知, k_f 的数值可以从表 16-2 中查出。

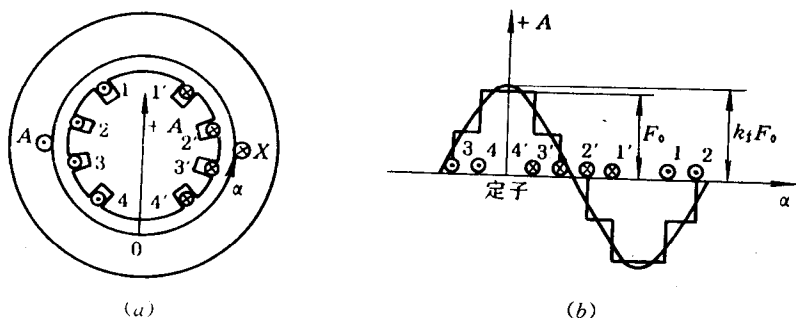


图 16-9 隐极电机的励磁磁动势

表 16-2 隐极电机励磁磁动势波形系数

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

从表中看出,当 $\gamma=0.75$ 时, k_f 的数值近于 1,也就是说,励磁磁动势波形是比较接近于正弦波的。汽轮发电机的励磁绕组也就是按照 $\gamma=0.67\sim 0.8$ 这样的范围来设计的。

为了分析问题方便,隐极同步电机的励磁绕组也用等值的集中整距线圈代替,如图 16-10(a)表示。图 16-10(b)是励磁磁动势的基波波形图,它随转子以同步速在空间旋转。

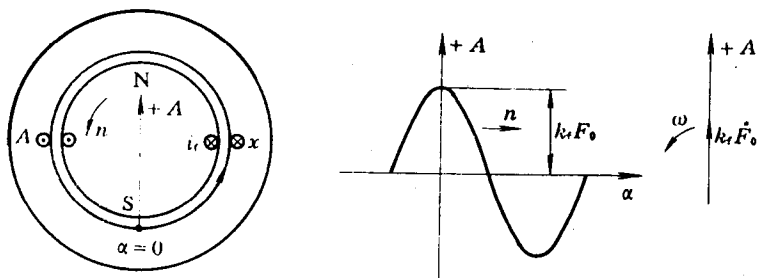


图 16-10 隐极机基波励磁磁动势

例 16-1

有一台转速为 3000r/min 的汽轮发电机的转子,它的大齿占整个圆周的 $\frac{1}{3}$ 。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。当通入的直流电流为 100A 时,求系数 k_f 及基波励磁磁动势的幅值 $k_f F_0$ 各为多大?

解 由于实际槽数为 $Z_2=20$,它占有 $\frac{2}{3}$ 圆周,所以分度数 $Z'_2=30$ 。计算 γ :

$$\gamma = \frac{Z_2}{Z'_2} = \frac{20}{30} = 0.66$$

由 γ 查表 16-2, 可得

$$k_i = 1.06$$

励磁绕组的串联匝数为 $W_i = 10 \times 10 = 100$ 匝, 通入直流电流为 $i_i = 100\text{A}$, 所以可以计算基波励磁磁动势幅值为

$$\begin{aligned} F_{01} &= k_i F_0 \\ &= \frac{1}{2} \times 1.06 \times 100 \times 100 = 5300 \text{ A} \end{aligned}$$

二、基波励磁磁动势空间向量

上面分析了转子励磁绕组产生的励磁磁动势, 其中最主要的也是最有用的量是幅值为 $k_i F_0$ 的基波励磁磁动势分布波, 它随转子一起旋转, 转速也是同步速 n 。这是一个旋转磁动势, 可用空间向量 $k_i F_0$ 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动势的幅值 $k_i F_0$, 向量位置放在基波磁动势正幅值的地方, 向量以同步电角速度 ω 逆时针方向转动。以图 16-10(a) 表示的隐极机为例, 画出励磁磁动势的基波空间向量图, 如图 16-10(c) 所示。因为图 16-10(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 $k_i F_0$ 在这个瞬间是和 $+A$ 轴重合的, 但它以同步电角速度 ω 逆时针方向转动。

例 16-2

已知一台凸同步电机转子以同步速 n 旋转, 转子绕组每对极匝数为 W_i , 转子绕组中通入直流电流 i_i , 励磁磁动势波形系数为 k_i , 在图 16-11(a) 所示瞬间, 转子初始位置 (S 极中心在坐标轴 α 上的位置) 为 $\alpha_0 = 60^\circ$, 在空间向量图上作出基波励磁磁动势空间向量 $k_i F_0$ 。

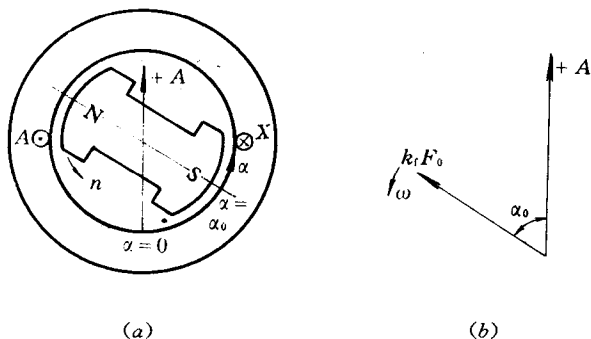


图 16-11 基波励磁磁动势

解 根据已经给定的数据可以算出励磁磁动势基波幅值大小, $k_i F_0 = \frac{4}{\pi} \times \frac{1}{2} W_i i_i$, 在图 16-11(a) 所示瞬间, 基波励磁磁动势幅值在空间坐标轴 α 上的位置是 $\alpha_0 = 60^\circ$ 处, 因此在图 16-11(b) 中, 可在逆时针方向离 $+A$ 轴 $\alpha_0 = 60^\circ$ 的地方, 画出励磁磁动势基波空间向量 $k_i F_0$, 它以同步电角速度 ω 逆时针方向旋转。

三、基波气隙磁密空间向量 $\vec{B}_0$

基波励磁磁动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

密与磁动势成正比,基波磁动势产生了正弦波磁密,在不考虑磁铁的磁滞涡流效应下,磁密波的相位和磁动势波的相位也相同,如图 16-12(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 16-12(b)所示。

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动势大小也不成正比,基波励磁磁动势在气隙中产生的磁密波是非正弦分布的。磁密波还要分出基波和谐波,基波磁密和基波磁动势仍然同相位。凸极机的这一特殊性还将在后面专门分析。

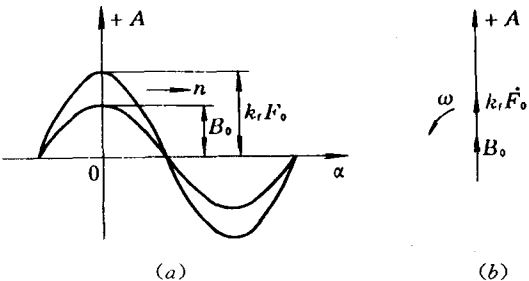


图 16-12 基波磁动势和磁密

四、定子绕组一相的感应电动势,时间相量 $\dot{E}_0$ 。

气隙磁密切割定子绕组,会在定子绕组中感应电动势,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动势大小随时间作正弦变化,一相感应电动势可以用时间相量来表示。由于空间坐标是选择 A 相绕组轴线 $+A$ 为参考轴,时间相量也分析 A 相的量, A 相感应电动势的有效值用 E_0 表示,时间相量用 $\dot{E}_0$ 表示。对于稳极电机,根据 $\omega t=0$ 时转子的位置,可以找到这一瞬时感应电动势 E_0 在时间相量图上的相位,我们先看转子的两个特殊初始位置。图 16-13(a)表示 $\omega t=0$ 时,转子 S 极中心在空间坐标上的位置是 $\alpha_0=0$ 的情况。图中规定了定子相绕组中电动势的正方向,它与轴线 $+A$ 是符合右手关系的。由于该瞬间 S 极中心与

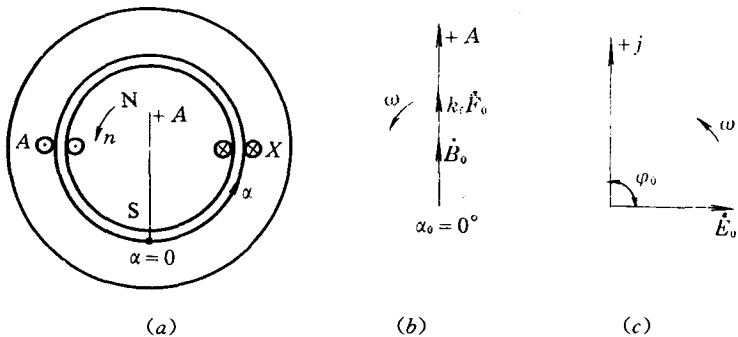


图 16-13 $\omega t=0^\circ$ 瞬间 $\alpha_0=0^\circ$ 的向量图

A 相轴线重合,这时的 $k_f F_0$ 及 B_0 均与 $+A$ 轴重合,如图 16-13(b)所示。这时 A 相线圈边处于极间,磁密为 0,这时 A 相绕组的感应电动势瞬时值为 0。我们将时间相量 $\dot{E}_0$ 表示在图 16-13(c)