

电 机 学

上 册

章 名 涛 主 編

科 学 出 版 社

内 容 简 介

本书是根据清华大学教研组历年教学经验而编写成的。编写的重

序 言

本书是清华大学电机教研组在 1961 年集体编的“电机学”讲义基础上经过修改和补充编写成的。

本书分为五篇,共三十三章,对主要类型电机的基本原理进行了分析,以便读者能掌握电机中的主要问题。书后有附录、思考题及习题供读者参考。

本书是在 1964 年出版的,这次仅是重印。本书存在不少缺点和错误,希望读者帮助指正,提出批评。

编 者

1973 年 1 月

目 录

緒論	1
----	---

第一篇 变 压 器

第一章 概述	11
§ 1-1 变压器的用途及分类	11
§ 1-2 变压器的主要部件的结构	13
§ 1-3 变压器的额定数据	19
§ 1-4 結語	20
第二章 变压器的运行分析	22
§ 2-1 概述	22
§ 2-2 理想变压器的运行	23
§ 2-3 变压器的无载情况	27
§ 2-4 变压器的負載运行	32
§ 2-5 变压器参数的計算和測定	44
§ 2-6 阻抗的标么值	53
§ 2-7 变压器的运行性能	56
§ 2-8 結語	61
第三章 变压器的联接組及三相变压器的运行問題	63
§ 3-1 概述	63
§ 3-2 变压器的联接	63
§ 3-3 三相变压器无載运行时的电势波形	71
§ 3-4 三相变压器不对称运行問題	74
§ 3-5 V/V 联接变压器	86
§ 3-6 結語	87
第四章 变压器的并联运行	89
§ 4-1 概述	89

§ 4-2 并联运行时的負載分配	91
§ 4-3 变比不等的变压器并联运行	94
§ 4-4 变压器联接組別对并联运行的关系	96
§ 4-5 結語	97
第五章 变压器的过渡过程	99
§ 5-1 概述	99
§ 5-2 过电流現象	99
§ 5-3 过电压現象	110
§ 5-4 結語	114
第六章 特殊变压器	116
§ 6-1 概述	116
§ 6-2 三繞組变压器	116
§ 6-3 自耦变压器	122
§ 6-4 調压变压器	128
§ 6-5 电鋸变压器	131
§ 6-6 結語	131
第七章 变压器的发热和冷却	133
§ 7-1 概述	133
§ 7-2 油浸变压器的发热和冷却	134
§ 7-3 变压器的各种冷却方式	138
§ 7-4 变压器的允許溫升和变压器的負載問題	142
§ 7-5 油浸变压器油箱的保护装置	145
§ 7-6 結語	147

第二篇 直流机

第八章 直流机的用途、基本工作原理及結構	148
§ 8-1 直流机的用途	148
§ 8-2 直流机的基本工作原理	149
§ 8-3 直流机的主要結構部件	151
§ 8-4 直流机的发展概况	157
§ 8-5 直流机的分类和我国生产的直流机的型号	158
§ 8-6 結語	158

第九章 无載时的磁場.....	159
§ 9-1 磁通的分布, 气隙磁密分布曲綫	159
§ 9-2 产生磁通的磁勢.....	160
§ 9-3 磁化曲綫.....	163
§ 9-4 結語.....	164
第十章 直流机的电枢繞組.....	166
§ 10-1 概述.....	166
§ 10-2 环形繞組轉化为鼓形繞組.....	167
§ 10-3 单迭繞組.....	169
§ 10-4 复迭繞組.....	174
§ 10-5 单波繞組.....	176
§ 10-6 复波繞組.....	180
§ 10-7 直流机电枢繞組的均压綫.....	182
§ 10-8 混合繞組.....	189
§ 10-9 槽內每层元件边 u 大于 1 的情况.....	191
§ 10-10 应用电势多边形的方法来分析电枢繞組.....	192
§ 10-11 各种繞組的应用范围.....	195
§ 10-12 繞組的感应电势.....	195
§ 10-13 結語.....	198
第十一章 直流发电机.....	199
§ 11-1 直流发电机的用途及分类.....	199
§ 11-2 直流发电机的运行原理.....	200
§ 11-3 直流发电机的运行特性.....	214
§ 11-4 直流发电机的并联运行.....	227
§ 11-5 結語.....	231
第十二章 直流电动机.....	233
§ 12-1 直流电动机的用途及分类.....	233
§ 12-2 直流电动机的运行原理.....	234
§ 12-3 直流电动机的运行性能.....	239
§ 12-4 直流电机的制动.....	254
§ 12-5 結語.....	257
第十三章 換向.....	259

§ 13-1 概述.....	259
§ 13-2 换向的电磁理论.....	261
§ 13-3 产生火花的原因.....	268
§ 13-4 改善换向的方法.....	271
§ 13-5 调整换向的方法.....	275
§ 13-6 直流机的环火现象.....	278
§ 13-7 結語.....	281
第十四章 特殊直流电机	282
§ 14-1 概述.....	282
§ 14-2 单极电机.....	283
§ 14-3 电机放大机.....	284
§ 14-4 結語.....	291
主要参考书	292
附录	293
一、关于变压器的基本公式.....	293
二、用对称分量解三相变压器不对称运行的方法.....	296
三、自耦变压器的等值电路和短路阻抗.....	300
习题	304
变压器习题.....	304
直流机习题.....	315

目 录

第三篇 同步电机

第十五章 同步电机概論	327
§ 15-1 概述	327
§ 15-2 同步电机的基本类型及其結構	330
§ 15-3 同步电机的发展概况	342
§ 15-4 結語	344
第十六章 同步电机的磁路、电枢繞組及电势	346
§ 16-1 概述	346
§ 16-2 同步电机的磁路	346
§ 16-3 对电枢繞組的要求及繞組結構	350
§ 16-4 导綫中的电势	352
§ 16-5 綫匝及元件中的电势	355
§ 16-6 整数槽繞組的电势	360
§ 16-7 齿諧波电势	370
§ 16-8 分数槽繞組	373
§ 16-9 結語	378
第十七章 电枢繞組的磁势	380
§ 17-1 概述	380
§ 17-2 一匝及元件的磁势	381
§ 17-3 相繞組的磁势	386
§ 17-4 三相繞組的磁势, 交流电机的旋轉磁場	392
§ 17-5 三相繞組的諧波磁势及其磁通	399
§ 17-6 三相繞組的磁势图	406
§ 17-7 分数槽三相繞組磁势的概念	408
§ 17-8 漏磁通及漏电抗	410

§ 17-9 結語	417
第十八章 同步发电机的对称运行	419
§ 18-1 概述	419
§ 18-2 无載特性	421
§ 18-3 对称負載时的电枢反应	422
§ 18-4 時間向量图与空間向量图	430
§ 18-5 对称負載时的向量图	432
§ 18-6 电压变化率及其求法	438
§ 18-7 短路特性和短路比	441
§ 18-8 負載特性	443
§ 18-9 发电机的运行特性	446
§ 18-10 参数的实验求法	447
§ 18-11 标么值	451
§ 18-12 結語	455
第十九章 同步发电机的不对称运行	457
§ 19-1 概述	457
§ 19-2 发电机不对称运行的分析	458
§ 19-3 发电机不对称短路的分析	465
§ 19-4 发电机不对称負載的分析	469
§ 19-5 不对称运行对发电机的影响	471
§ 19-6 不对称运行的高频干扰	472
§ 19-7 阻尼繞組在不对称运行中的作用	473
§ 19-8 結語	474
第二十章 同步发电机的突然短路	475
§ 20-1 概述	475
§ 20-2 突然短路分析的理论基础——超导体迴路的概念	475
§ 20-3 三相突然短路分析	478
§ 20-4 不对称突然短路	496
§ 20-5 突然短路与同步电机及电力系统的关系	500
§ 20-6 結語	504
第二十一章 同步发电机的并联运行	505

§ 21-1 概述	505
§ 21-2 并联条件及方法	506
§ 21-3 同步发电机与无穷大电网并联运行	512
§ 21-4 同步发电机与相近容量的电网并联运行	523
§ 21-5 結語	526
第二十二章 同步电动机及补偿机	527
§ 22-1 同步电动机	527
§ 22-2 反应式同步电动机	535
§ 22-3 补偿机	537
§ 22-4 結語	540
第二十三章 同步电机的振荡	541
§ 23-1 概述	541
§ 23-2 同步电机在振荡过程中力矩平衡方程式	544
§ 23-3 同步电机的自由振荡	547
§ 23-4 同步电机的强制振荡	547
§ 23-5 結語	550
第二十四章 同步电机的损耗、效率、发热和冷却	551
§ 24-1 概述	551
§ 24-2 大型同步机的损耗和效率	552
§ 24-3 大型同步机的发热与冷却	557
§ 24-4 結語	567

第四篇 异步电机

第二十五章 异步电机概論	568
§ 25-1 异步电机的用途	568
§ 25-2 基本工作原理及运行中的問題	569
§ 25-3 异步机的分类和主要結構部件	572
§ 25-4 异步电机的发展概况	577
§ 25-5 我国生产的异步机的型号	578
§ 25-6 結語	579
第二十六章 异步电机运行原理	580

§ 26-1 概述.....	580
§ 26-2 异步机在轉子不动时的情况及其基本原理.....	581
§ 26-3 异步机在旋轉时的情况及其基本方程式及等值电路.....	589
§ 26-4 异步机的等值电路及其簡化.....	593
§ 26-5 鼠籠轉子的参数及折合.....	596
§ 26-6 异步机的力矩.....	600
§ 26-7 力矩的实用公式.....	605
§ 26-8 异步机的运行特性.....	606
§ 26-9 結語.....	611
第二十七章 异步机的圓图.....	613
§ 27-1 概述.....	613
§ 27-2 异步机的簡單圓图.....	615
§ 27-3 由无載及短路試驗作出簡單圓图.....	618
§ 27-4 由簡單圓图确定异步机的运行特性.....	624
§ 27-5 柯斯琴柯的較准确圓图.....	631
§ 27-6 結語.....	633
第二十八章 三相异步电动机的起劲.....	634
§ 28-1 概述.....	634
§ 28-2 鼠籠式电动机的起劲.....	635
§ 28-3 有較高起动力矩的鼠籠式电动机.....	639
§ 28-4 繞綫式电动机的起劲.....	647
§ 28-5 异步电机的附加力矩和对起劲的影响.....	648
§ 28-6 同步电动机的异步起劲.....	653
§ 28-7 結語.....	655
第二十九章 三相异步电动机的調速.....	657
§ 29-1 概述.....	657
§ 29-2 变更电压 U_1 的調速.....	657
§ 29-3 变更极对数的調速.....	658
§ 29-4 变更頻率的調速.....	664
§ 29-5 变更轉子串联电阻的調速.....	665
§ 29-6 串級联接的調速.....	665

§ 29-7 結語	668
第三十章 异步机的其它运行方式	669
§ 30-1 概述	669
§ 30-2 异步发电机的原理	669
§ 30-3 异步发电机的运行	672
§ 30-4 异步机的制动	675
§ 30-5 移相器	678
§ 30-6 感应調压器	679
§ 30-7 結語	682
第三十一章 单相异步电动机	684
§ 31-1 概述	684
§ 31-2 单相电动机的工作原理	684
§ 31-3 单相电容器电动机	690
§ 31-4 遮极电动机	693
§ 31-5 結語	693

第五篇 交流整流子电机

第三十二章 三相整流子电机	695
§ 32-1 概述	695
§ 32-2 三相整流子电机中的几个共同問題	696
§ 32-3 异步电动机副边串入附加电势	700
§ 32-4 三相并联整流子电动机	703
§ 32-5 三相串联整流子电动机	708
§ 32-6 相位补偿机	712
§ 32-7 变频机	716
§ 32-8 三相整流子发电机	717
§ 32-9 异步电动机的串級联接	721
§ 32-10 結語	722
第三十三章 单相整流子电动机	723
§ 33-1 概述	723
§ 33-2 单相整流子电动机的电势、力矩及換向	723

§ 33-3 串联电动机.....	727
§ 33-4 推斥电动机.....	730
§ 33-5 結語.....	735
主要参考书.....	736
附录.....	737
四、关于繞組系数的符号	737
五、异步机的基本原理(瞬时值法)	740
六、电机的力矩	747
七、电机中的慣例	756
习题.....	758
同步电机习题	758
异步电机习题	789

第三篇 同步电机

第十五章 同步电机概論

§ 15-1 概 述

同步电机主要用做发电机。現在工农业所用的交流电能，几乎全由同步发电机发出。

同步电机还可以用做电动机，以拖动生产机械。尤其在不要求調速的大功率生产机械中，同步电动机用得很广泛。

另外，同步电机还可做同步补偿机用，即只向电网发出电感性的或电容性的无功功率，以满足电网对无功功率的需要。

同步电机作为发电机用时，其运行原理如下。图 15-1 为同步电

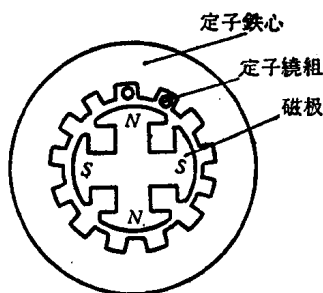


图 15-1 同步电机构造原理图

机的构造原理图。在定子铁心上开槽，槽内放置导线，轉子上装有磁极和激磁繞組。当激磁繞組通以直流电流后，电机内就会产生磁場。轉动轉子，則磁場与定子导线之間有相对运动，就会在定子导线中感应出交流电势。如把这些导线按一定規律联成繞組（一般为三相繞組），則可从繞組（出线端）引出交流电势，这个交流电势的頻率 f 决定于电机的极对数 p 和轉子轉速 n ，就是頻率等于极对数乘上每秒的轉数，

$$f = \frac{pn}{60} \text{ 周波/秒,} \quad (15-1)$$

上式中， n 的单位是每分鐘的轉数。

由上式可以看出,当电机的极对数一定和轉速一定时,則发出的交流电势頻率也是一定的。在我国的电力系統中,規定交流电的頻率為 50 周/秒。因此如电机为一对极时,額定轉速為 3000 轉/分;有二对极时,額定轉速就為 1500 轉/分;余类推。

如作为同步电动机運轉时,則需要在定子繞組上加以交流电(一般均为三相),此三相交流电通过定子繞組时,就会在电机內产生一个旋轉磁場。当激磁繞組已加上激磁电流,則轉子好象是一个“磁鉄”,于是旋轉磁場就带动这个“磁鉄”,并按旋轉磁場的轉速来旋轉。这时轉子的轉速 n 仍旧要符合式(15-1)的关系,即

$$n = \frac{60f}{p} \quad (15-2)$$

从这里看出,同步电机無論做为发电机,或是做为电动机,其轉速与頻率間有着严格的关系,这是同步电机的一个特点。在下一篇中,我們要講到异步电机,它的轉速和頻率之間就沒有同步电机这样的严格关系。

上面介紹的只是同步电机的簡單的运行原理,更深入的运行原理和运行性能,将要在这一篇的以后各章中分別加以叙述。

因为同步电机主要用做发电机,故在以后各章的分析中,我們的重点放在发电机部分。而且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規律和可逆的关系,在掌握了发电机的运行性能后,电动机的运行性能是可以很快掌握的。因此在第二十一章前主要是分析发电机的运行情况。

在作为发电机运行时,首先的問題是发电机如何能发电,即电势是怎样产生的,电势的大小和波形又如何? 这些問題与同步电机的磁路和繞組有密切关系,因此下一章首先要分析“同步电机的磁路及繞組电势”这些問題。

当发电机带上負載后,电枢繞組中的电流会在电机內产生一个磁势,它的大小、性質又如何? 这由“电枢繞組磁势”一章进行分析。至于磁势对运行的性能的影响,将归入运行的几章中去分析。

同步发电机有二种运行情况:一种是单独一台电机带負載;另

一种是数台发电机并联运行供給負載。現在大多数同步发电机都是并联运行，即并联成一个大电网供給負載。但单机运行还是有的，故这二种运行情况都应当进行分析。从理論分析的次序来看，先从单机运行分析起易于掌握，故我們先分析单机运行。

同步发电机大多为三相，故正常的单机运行总是带三相对称負載。“同步发电机的对称运行”一章就是分析发电机带上三相对称負載，并在稳定运行时的情况。这一章又是学习同步电机的重要理論基础。它将对电机内部的电磁关系进行綜合的研究。其中要分析到电枢反应的作用；要得出向量图这一分析工具；要討論到发电机的特性和参数的意义，和它們的實驗求法等。这些不但在发电机中是重要的理論基础，而且完全可以应用到对电动机的分析中去。

当然发电机的負載不会总是三相对称的，有时也可能带上不对称負載。这时对电机和用戶都可能带来某些不利的影响。因此我們必須掌握不对称运行的影响及分析方法，以及避免某些不利后果的措施。

同步发电机在运行时，有时会发生綫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。因此在“同步发电机的突然短路”这一章中，我們要分析突然短路时产生电流冲击的原因及后果。

在叙述了单机运行中的主要問題后，我們就要对“同步发电机的并联运行”进行分析。这章要解决的主要問題是：如何进行并联；并联以后有功功率及无功功率如何調节；以及为了保証可靠地稳定并联运行，从原理上如何保持电机的“静态稳定”。

在分析完发电机运行后，我們可以利用发电机运行中的一些基本理論，来分析电动机和补偿机的运行原理和性能。

最后，在这一篇中，还要对发电机和电动机运行中的一些共同問題进行介紹，这些問題是：“同步电机的振蕩”，“同步电机的損耗与效率”，“发热与冷却”等問題。

在具体分析同步电机的性能前，首先要对同步电机的結構有

一个了解。下面我们就对同步电机的结构作一介绍。

§ 15-2 同步电机的基本类型及其结构

同步电机可以按许多种方式来分类。

如按用途分,可以分为发电机,电动机和补偿机。

如按结构特点分,可以分为凸极式和隐极式;或立式和卧式(水平式)。

如按通风方式分,可以分为开启式,防护式,封闭式(循环通风);如按冷却方式分,可以分为空气冷却,氢气冷却和液体冷却。

如按原动机之不同来分,可以分为汽轮发电机,水轮发电机和其他原动机带动的发电机(如柴油机等)。

如按电动机的负载不同来分,可以分为带均匀负载,交变负载和冲击负载的电动机。

当然还可以有其他各种不同的分类方法。不同类型的电机,都有其不同的特点,通过分类后,可以分别进行深入的分析。在电机学中,我们主要是分析同步电机的结构和运行性能之间的关系,因此主要地按凸极式和隐极式来分析。这二种有时就叫做同步电机的基本类型。

凸极式电机从转子上看,有着明显的磁极,如图 15-1 所示。当通以激磁电流后,每个磁极就出现一定的极性,相邻磁极交替出现南极和北极。

隐极式电机从转子上看,没有凸出的磁极,见图 15-3。但通以激磁电流后,转子圆周也会出现南极和北极的极性。因此从运行原理上隐极式和凸极式没有差别,而在结构上,运行性能上和分析方法上是有差别的。

同步电机采用凸极式还是隐极式,主要要从它的容量和转速来定。在大容量(几千或几万瓩)的同步发电机,如原动机为转速很高的汽轮机(例如每分钟达到 1500 转、3000 转),则同轴联接的发电机转速也很高,转子各部分所受的离心力很大,这时采用隐极式较好,因为隐极机可以把激磁绕组很好地固定在转子上。如果