

电机学

高等学校教材

电机学

叶 东 编

津新登字(90)003号

责任编辑: 苏 飞

高等学校教材

电机学

叶 东 编

*

天津科学技术出版社出版、发行

天津市张自忠路189号 邮编300020

华北电力学院印刷厂印刷

*

开本787×1092毫米 1/16 印张33.25 字数786 000

1995年2月第1版

1995年2月第1次印刷

印数: 1—3 000

ISBN 7-5308-1752-3

G·452 定价:24.70元

编 者 的 话

本书是参照高等学校电力工程类专业教学指导委员会、电机学小组审订的《电机学课程教学基本要求》编写的。该书可作为电力工程类专业的教材和该专业的函授教材,也可供有关工程技术人员参考。

该书秉着紧密联系电力工程类专业实际,并贯彻少而精的原则,逐一论述了变压器、同步电机、异步电机和直流电机的基本结构、电磁过程、理论分析方法、参数和运行特性。为了便于复习和自学,每章前提出了本章重要内容,每章末附有小结。到一定阶段有自测题,以检验读者自己掌握基本内容的程度。书后还有思考题和习题。为了使读者初步掌握一些电机英语词汇,除把正文中的有关电机名词用英文标注外,还在习题中编入了少量英文题。

该书的第一稿是由叶东编写变压器、同步电机、异步电机部分,孙启坤编写直流电机部分。在此基础上,叶东对全书进行了修改,对某些章节进行了重写。施传立老师对全书作了仔细的审核。经过多年的使用和教学实践,这次又对全书进行了较仔细的修订,并请李和明老师审订了同步电机部分,朱凌老师审订了直流电机部分。修订过程中,华北电力学院电机教研室的同志提出了许多建设性的意见。

本书由天津大学阎学文教授主审。上海交通大学林国汤教授、东北电力学院杨玉荣教授某些章节也进行了仔细审阅,广西大学陈可新副教授对全书提出了许多宝贵意见,华北、院教材中心对该书的出版给予了多方面的支持,在此一并致谢。

在编写过程中,参考了李发海等主编的《电机学》、许实章主编的《电机学》和汤蕴璆等主编的《电机理论与运行》,为此,也对上述主编表示谢意。

由于水平有限,热忱地希望读者对书中的缺点和错误批评指正。

编 者

1994年1月于保定

开本 787×1092 1/32

1995年2月第1版

1995年2月第1次印刷

印数: 1—3 000

ISBN 7-5308-1752-3

G·452 定价: 24.70元

目 录

概论.....	1
§ 0-1 电机的作用及主要类型	1
§ 0-2 电机中所用材料和铁磁材料的特性	2
§ 0-3 研究电机常用的电磁定律	5
§ 0-4 旋转电机中的电动势、转矩与能量转换	15
§ 0-5 磁路和磁路计算	16
概论自测题	22

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的基本工作原理和结构	24
§ 1-1 变压器在电力系统中的应用	24
§ 1-2 变压器的基本工作原理及分类	25
§ 1-3 变压器的基本结构	28
§ 1-4 变压器的额定值	35
小 结	37
第二章 变压器的运行分析	38
§ 2-1 变压器各电磁量的规定正方向	38
§ 2-2 变压器的空载运行	39
§ 2-3 变压器的负载运行	47
§ 2-4 变压器参数的测定	54
§ 2-5 标么值	57
§ 2-6 变压器的运行性能	61
小 结	
第一章至第二章自测题	
第三章 三相变压器	
§ 3-1 三相变压器的磁路系统	
§ 3-2 三相变压器的电路系统——绕组的联结和联结组	
§ 3-3 三相变压器空载运行时的电动势波形	
§ 3-4 三相变压器的不对称运行	

§ 3-5 变压器的 V, v 联结	89
小 结	90
第三章自测题	90
第四章 三绕组变压器、自耦变压器和互感器	92
§ 4-1 三绕组变压器	92
§ 4-2 自耦变压器	100
§ 4-3 电流互感器和电压互感器	107
小 结	109
第五章 变压器的并联运行	110
§ 5-1 概述	110
§ 5-2 变压器的理想并联条件	110
§ 5-3 变比相同、短路阻抗标么值不相等的变压器并联运行时的负载分配	111
§ 5-4 变比不相等的变压器并联运行时的负载分配	113
小 结	114
第六章 变压器的瞬态过程	115
§ 6-1 概述	115
§ 6-2 变压器空载合闸时的瞬态过程	115
§ 6-3 变压器副边突然短路的瞬态过程	118
小 结	120
第四章至第六章自测题	121

第二篇 同 步 电 机

第七章 同步电机的基本知识及结构	122
§ 7-1 概述	122
§ 7-2 同步电机的基本工作原理	123
§ 7-3 同步电机的基本结构	124
§ 7-4 同步电机的励磁方式	130
§ 7-5 同步电机的额定值	135
结 语	135
绕组和电动势	136
基本概念	136
.....	138
.....	143
.....	147

§ 8-5 谐波电动势及其削弱的方法	157
小 结	158
第九章 交流绕组的磁动势	159
§ 9-1 概述	159
§ 9-2 一相绕组的磁动势	159
§ 9-3 三相绕组的磁动势	171
§ 9-4 椭圆形旋转磁动势	179
§ 9-5 三相绕组合成磁动势图	183
§ 9-6 交流绕组漏磁通和漏抗的概念	184
小 结	185
第七章至第九章自测题	186
第十章 同步发电机的基本电磁关系	189
§ 10-1 同步发电机的空载运行	189
§ 10-2 三相同步发电机的电枢反应	190
§ 10-3 隐极同步发电机的电动势方程式、同步电抗和相量图	195
§ 10-4 凸极同步发电机的双反应理论	199
§ 10-5 凸极同步发电机的电动势方程式、同步电抗和相量图	202
§ 10-6 从空载特性、短路特性求同步电抗的不饱和值和短路比	207
§ 10-7 用转差法试验测同步电机的同步电抗	211
§ 10-8 同步发电机的零功率因数负载特性及保梯电抗的测定	212
§ 10-9 同步发电机的外特性和调整特性	215
小 结	217
第十一章 同步发电机的并联运行	218
§ 11-1 概述	218
§ 11-2 同步发电机并联投入的条件和方法	219
§ 11-3 同步发电机的功率和转矩平衡方程式	223
§ 11-4 同步电机的功角特性	224
§ 11-5 同步发电机与无限大电网并联运行时有功功率的调节和静态稳定	228
§ 11-6 无功功率的调节和 V 形曲线	232
小 结	236
第十章至第十一章自测题	237
第十二章 同步电动机和同步调相机	
§ 12-1 同步电动机的基本方程式和相量图	
§ 12-2 同步电动机的 V 形曲线	
§ 12-3 同步电动机的起动方法	24

§ 12-4 反应式同步电动机	245
§ 12-5 同步调相机	247
小 结	249
第十三章 同步发电机的不对称运行	250
§ 13-1 概述	250
§ 13-2 同步发电机不对称运行时的相序电动势、相序电抗和等效电路	251
§ 13-3 同步发电机的不对称运行分析实例	246
§ 13-4 不对称运行的影响	260
小 结	261
第十四章 同步发电机的三相突然短路	262
§ 14-1 概述	262
§ 14-2 超导体闭合回路磁链守恒原理	262
§ 14-3 同步发电机空载时发生三相突然短路的物理过程	264
§ 14-4 瞬态和超瞬态电抗的测定方法	278
§ 14-5 突然短路对同步电机的影响	279
小 结	282
第十二章至第十四章自测题	282

第三篇 异步电机

第十五章 三相异步电动机的基本结构和基本工作原理	284
§ 15-1 概述	284
§ 15-2 异步电机的基本结构	285
§ 15-3 三相异步电机的工作原理和异步电机的三种运行状态	289
§ 15-4 异步电动机的额定值	292
小 结	293
第十六章 三相异步电动机的运行原理	295
§ 16-1 概述	295
§ 16-2 转子静止时的异步电动机	296
§ 16-3 转子旋转时的异步电动机	307
§ 16-4 笼型转子的极数、相数和匝数	316
§ 16-5 异步电动机的参数测定	318
小 结	321
十五章至第十六章自测题	322
第十七章 异步电动机的功率、转矩和运行特性	324

§ 17-1 异步电动机的功率关系	324
§ 17-2 异步电动机的转矩关系	328
§ 17-3 三相异步电动机的工作特性	329
小 结	341
第十七章自测题	342
第十八章 三相异步电动机的起动	343
§ 18-1 异步电动机的起动性能	343
§ 18-2 笼型异步电动机的起动	344
§ 18-3 绕线转子异步电动机的起动	351
§ 18-4 具有高起动转矩的笼型异步电动机	355
§ 18-5 谐波磁场产生的附加转矩及其对起动的影响	357
小 结	360
第十九章 三相异步电动机的调速	361
§ 19-1 概述	361
§ 19-2 变极调速	361
§ 19-3 变频调速	365
§ 19-4 不改变同步转速的调速方法	367
小 结	370
第十八章至第十九章自测题	371
第二十章 异步电机的其它运行方式	373
§ 20-1 异步发电机	373
§ 20-2 异步电机的制动运行	378
§ 20-3 移相器和感应调压器	380
小 结	382
第二十一章 不对称电压下三相异步电动机的运行及单相异步电动机	383
§ 21-1 不对称电压下三相异步电动机的运行	383
§ 21-2 单相异步电动机	386
小 结	393

第四篇 直 流 电 机

第二十二章 直流电机的基本工作原理和基本结构	394
§ 22-1 概述	394
§ 22-2 直流电机的基本工作原理	394
§ 22-3 直流电机的基本结构	397

§ 22-4	直流电机的型号和额定值	401
小 结		402
第二十三章	直流电机的共同问题	403
§ 23-1	直流电机电枢绕组的一般知识	403
§ 23-2	单叠绕组	405
§ 23-3	单波绕组	408
§ 23-4	直流电机的磁势和磁场	410
§ 23-5	直流电机的电枢反应	414
§ 23-6	直流电机电枢绕组的感应电动势和电磁转矩	416
§ 23-7	直流电机的换向	418
§ 23-8	电位差火花、环火及防止方法	425
小 结		427
第二十四章	直流发电机	428
§ 24-1	直流发电机的用途及分类	428
§ 24-2	直流发电机稳态运行时的基本方程式	429
§ 24-3	他励直流发电机的运行特性	432
§ 24-4	并励直流发电机的自励条件和特性	434
§ 24-5	复励直流发电机的特性	437
小 结		441
第二十五章	直流电动机	442
§ 25-1	直流电机的可逆原理	442
§ 25-2	直流电动机的基本方程式	444
§ 25-3	直流电动机的基本方程式	445
§ 25-4	直流电动机的工作特性	447
§ 25-5	直流电动机的机械特性和电动机组稳定运行的条件	451
§ 25-6	直流电动机的调速	454
§ 25-7	直流电动机的制动	456
小 结		460
第二十六章	旋转电机的发热和冷却	462
§ 26-1	概述	462
§ 26-2	电机中常用绝缘材料的等级和电机各部分的温升限度	462
§ 26-3	电机的发热和冷却过程	465
§ 26-4	电机的定额	467
§ 26-5	电机的通风冷却方式	467
小 结		470

第二十二章至第二十六章自测题.....	471
---------------------	-----

电机学习题集

I 概论	473
习题一 感应电动势和电磁力.....	473
习题二 磁路计算.....	474
II 变压器	475
习题三 变压器的空载运行.....	475
习题四 变压器的空载运行.....	476
习题五 变压器的负载运行.....	477
习题六 变压器的负载运行.....	479
习题七 三相变压器.....	480
习题八 三相变压器.....	481
习题九 三绕组变压器和自耦变压器.....	482
习题十 变压器的并联运行.....	483
III 同步电机	485
习题十一 交流绕组的电动势.....	485
习题十二 交流绕组及其电动势.....	486
习题十三 交流绕组的磁动势.....	487
习题十四 交流绕组的磁动势.....	487
习题十五 交流绕组的磁动势.....	488
习题十六 同步发电机的电枢反应.....	490
习题十七 同步发电机基本电磁关系.....	492
习题十八 同步发电机基本电磁关系.....	493
习题十九 同步电机的参数.....	494
习题二十 同步发电机的并联运行.....	496
习题二十一 同步发电机的并联运行.....	496
习题二十二 同步电动机和同步补偿机.....	498
习题二十三 同步发电机的不对称运行.....	499
习题二十四 同步发电机的三相突然短路.....	500
IV 异步电机	501
习题二十五 异步电动机基本工作原理.....	501
习题二十六 异步电动机运行分析.....	501
习题二十七 异步电动机运行分析.....	503
习题二十八 异步电动机的功率和转矩.....	504

习题二十九	异步电动机的机械特性	505
习题三十	异步电动机的机械特性	506
习题三十一	异步电动机的起动	506
习题三十二	异步电动机的调速	507
V	直流电机	508
习题三十三	直流电机的绕组	508
习题三十四	直流电机的电枢反应	50
习题三十五	直流电机的感应电动势和电磁转矩	510
习题三十六	直流电机的换向	510
习题三十七	直流发电机	511
习题三十八	直流电动机	512
习题三十九	直流电动机	513

主要符号表

A ——电负荷	f_1 ——基波频率
a ——交流绕组并联支路数 直流电机绕组并联支路对数 对称分量法中的算子	f_2 ——异步电机转子电流频率
B ——磁通密度	f_ν —— ν 次谐波频率
B_m ——平均磁通密度	H ——磁场强度
B_δ ——气隙磁密	H_c ——矫顽力
B_{1m} ——基波磁密最大值	h ——高度
b ——电纳	I ——电流有效值
C_e ——电势常数	I_0 ——空载电流
C_M ——转矩常数	I_m ——激磁电流
D ——直径	I_1, I_2 ——变压器原、副边电流 异步电机定、转子电流
E ——电势有效值	I_a ——电枢电流
E_1, E_2 ——变压器原、副边电动势 异步电机定、转子电动势	I_d ——电枢电流直轴分量
E_0 ——空载电动势	I_q ——电枢电流交轴分量
E_{a1}, E_{a2} ——变压器原、副边漏磁电动势 异步电动机定、转子漏磁电动势	I_K ——短路电流
E_δ ——气隙电动势	I_L ——短路电流直流分量
E_φ ——相电动势	I_L ——短路电流交流分量
E_l ——线电动势	I_n ——起动电流
e ——电动势的瞬时值	I_N ——额定电流
F ——磁动势	I_f ——励磁电流
F_1, F_2 ——变压器原、副边磁动势 异步电机定、转子磁动势	I^+, I^-, I^0 ——分别为正序、负序和零序电流
F_0 ——空载磁动势	i ——电流的瞬时值
F_m ——激磁磁动势	J ——转动惯量
F_a ——电枢反应磁动势	K ——换向器片数
F_{ad} ——直轴电枢反应磁动势	K_c ——短路比
F_{aq} ——交轴电枢反应磁动势	k ——变比
F_f ——同步电机励磁磁动势	k_e ——电动势比
F_δ ——气隙磁动势	k_i ——电流比
f ——频率; 力; 磁动势瞬时值	k_a ——自耦变压器变比
	k_δ ——气隙系数(卡氏系数)
	k_{ad}, k_{aq} ——直轴和交轴电枢反应折算系数
	k_{q1} ——绕组基波分布因数

k_{y1} ——绕组基波节距因数	s ——转差率
k_{w1} ——基波绕组因数	s_m ——临界转差率
k_m ——过载能力	T ——周期,时间常数
k_μ ——磁路饱和因数	T_M ——电磁转矩
L ——自感系数,长度	T_L ——负载转矩
M ——互感系数	T_0 ——空载转矩
m ——相数	T_N ——额定转矩
N ——电枢导体数	T_{max} ——最大转矩
n ——转速	T_s ——起动转矩
n_1 ——同步速	t ——时间,温度
n_N ——额定转速	U ——电压有效值
P ——功率	U_N ——额定电压
P_1, P_2 ——输入和输出功率	U_s ——电网电压
P_M ——电磁功率	U_G ——发电机电压
P_D ——机械功率	U^+, U^-, U^0 ——分别为正序、负序和零序电压
P_N ——额定功率	ΔU ——电压调整率
p ——极对数	u ——电压瞬时值
p_0 ——空载损耗	u_K ——短路电压
p_{Fe} ——铁耗	u_{Kd}, u_{Kr} ——短路电压的有功和无功分量
p_{Cu} ——铜耗	v ——线速度
p_m ——机械损耗	W ——能量
p_{ad} ——附加损耗	w_1, w_2 ——变压器原、副边绕组匝数
p_f ——励磁损耗	异步电机定、转子绕组匝数
Q ——无功功率,热量	w_c ——线圈匝数
q ——每极每相槽数	x_1, x_2 ——变压器原、副边漏电抗
R_L ——负载电阻	异步电机定、转子漏电抗
R_m ——磁阻	x_m ——激磁电抗
R_f ——励磁回路调节电阻	x_a ——电枢反应电抗
R_s ——起动电阻	x_{ad} ——直轴电枢反应电抗
r_1, r_2 ——变压器原、副边电阻	x_{aq} ——交轴电枢反应电抗
异步电机定、转子电阻	x_K ——短路电抗
r_a ——电枢绕组电阻	x_p ——保梯电抗
r_{Kd} ——直轴阻尼绕组电阻	x_s ——同步电抗
r_f ——励磁绕组电阻	x_d ——直轴同步电抗
r_K ——短路电阻	x_q ——交轴同步电抗
r_m ——铁耗等效电阻	x'_d, x''_d ——直轴瞬态和超瞬态电抗
S ——视在功率,面积,元件数	y ——节距
S_N ——额定容量	y_K ——换向器节距

Z ——电机槽数	ν ——谐波次数
Z_s ——直流电机虚槽数	τ ——极距
z_1, z_2 ——变压器原、副边漏阻抗	Φ ——磁通
异步电机定、转子漏阻抗	Φ_0 ——同步电机和直流电机励磁磁通(主磁通)
z_m ——激磁阻抗	Φ_s ——电枢反应磁通
z_L ——负载阻抗	Φ_{ad}, Φ_{aq} ——直轴和交轴电枢反应磁通
z_K ——短路阻抗	Φ_g ——气隙磁通
α ——角度	Φ_m ——变压器主磁通最大值
β ——角度; 负荷系数	Φ_σ ——漏磁通
γ ——角度; 电导率	φ ——功率因数角
δ ——气隙长度	ψ ——磁链; 内功率因数角
η ——效率	Ω ——机械角速度
$\eta_{\max}$ ——最大效率	ω ——角频率
θ ——功率角; 温度	$*$ ——右上角加星标为标么值
Λ_m ——磁导	$'$ ——右上角加一撇为归算值
μ ——磁导率	

本书采用的主要物理量单位符号

A——安	Wb——韦伯
V——伏	Mx——麦克斯韦
kV——千伏	Gs——高斯
kW——千瓦	Oe——奥斯特
W——瓦	rad/s——弧度/秒
kVA——千伏安	r/min——转/分
kVAR——千乏	N——牛顿
Ω ——欧姆	m——米
H——亨利	N·m——牛顿·米
Hz——赫兹	kg——公斤
T——特斯拉	s——秒

概 论

§ 0-1 电机的作用及主要类型

电能国民经济和国防建设中获得了广泛的应用,而电机是生产、传输、分配及应用电能的主要设备,它在电力系统中占有相当重要的地位。同步发电机是电力系统的电源;变压器是输配电能的关键设备;异步电机是用电单位的一种主要原动机;直流电机在电力、交通运输、化工等部门也起着重要的作用。所以,对于电力类专业的学生,深刻地理解和掌握电机原理和性能,较全面地了解电机结构,学会分析电机运行中的问题,是非常必要的。

电机是根据电磁感应定律和电磁力定律实现电能和机械能之间相互转换的机械。发电机可把机械能转换为电能;电动机却把电能转换为机械能。其机电转换系统示意图如图 0-1(a)所示,图中箭头表示能量传递方向。

由于变压器是根据电磁感应定律可把一种电压等级的交流电能转换成另一种电压等级的交流电能的电器,其基本原理和异步电机有许多共同点,因此,人们把变压器也作为电机来进行研究。它的能量转换示意图如图 0-1(b)所示。

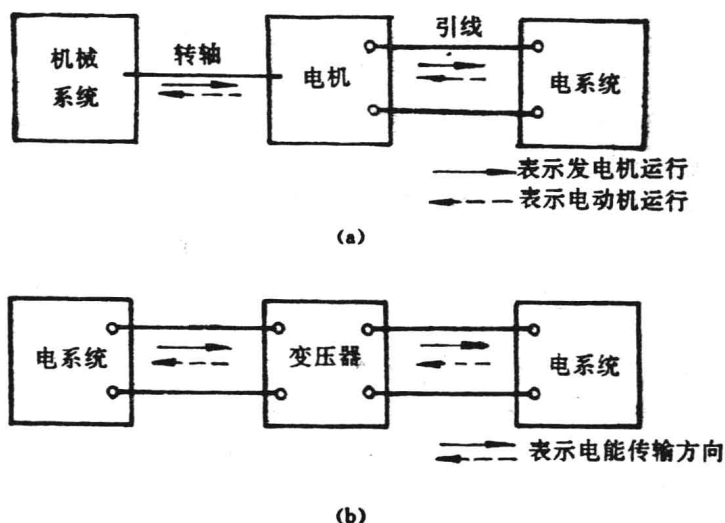


图 0-1 电机能量转换示意图

电机的种类、型式十分繁多,按电流形式和用途可作如下分类:

一、按电流形式分类

(一) 直流电机(*direct current machine*)

电机输出或输入的能量为直流电能

(二) 交流电机(*alternating current machine*)

电机输出或输入的能量为交流电能。交流电机主要包括变压器、同步电机(*synchronous*

machine)和异步电机(asynchronous machine)三大类。

二、按用途分类

(一)变压器(transformer)

它是将某一等级的交流电压与电流转变成另一等级的交流电压与电流的静止电器。

(二)发电机(generator)

它是将机械能转换成电能的旋转电机。

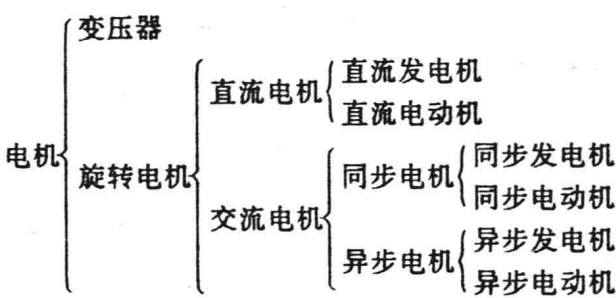
(三)电动机(motor)

它是将电能转换成机械能的旋转电机。还有一种直线运动的电动机,本书不作研究。

(四)控制电机(controlling machine)

它们的目的是主要不是为了传递能量,而是为了执行某种控制任务。它们有专门的书籍讨论,本书不作研究。

按照上述分类可归纳如下:



值得指出:发电机和电动机是同一电机的两种不同运行方式,其基本原理是一致的。

§ 0-2 电机中所用材料和铁磁材料的特性

电磁感应原理

电机是一种以磁场为媒介,按照电磁感应原理实现能量转换的换能机械,所以在电机里必须具有引导磁通的铁心磁路和引导电流的良好导体电路。为了把带电部分分隔开以构成电路,带电导体之间及导体与铁心之间还应有绝缘物质。此外,还有既不属于磁路也不属于电路,但却是构成电机整体所必须的结构部分。因此电机主要由以下四部分材料构成。

导电材料:用来构成电路。为了减小电阻损耗,电机线圈常采用紫铜线或铝线制成。

导磁材料:用来构成磁路。为了增加磁路的导磁性能,使在一定的励磁电流下产生较强的主磁场,电机和变压器的主磁路一般采用导磁性能较高和铁心损耗较小的硅钢片制成;而在直流单向磁路且兼作结构支撑的部分,则常采用导磁性能较高的钢板或铸钢制成。

绝缘材料:要求介电强度高,耐热性能好。常用的绝缘材料有 A、E、B、F、H、C 等级。由于各种绝缘材料的成分不同,所以耐热能力也不同。各级绝缘材料的极限容许温度见表 0-1。

表 0-1 各级绝缘材料的极限容许温度

A 级	E 级	B 级	F 级	H 级	C 级
105℃	120℃	130℃	155℃	180℃	180℃以上