

140000

TM3
0033

高等学校教材



电机学

北京动力经济学院 高之櫟 主编

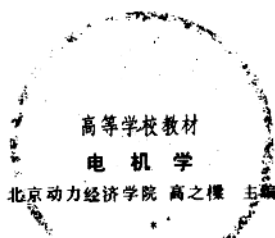
水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 简 介

本书主要论述变压器、直流电机、同步电机和异步电机四种类型的电机。对各种电机的基本电磁关系、运行原理和运行特性作了较为深入的分析。全书重视物理概念的阐述,并附有习题。名词术语、单位符号采用新的国家标准。

本书是作为普通高等学校电力系统运行及管理有关的专业的教科书编写的,也可作为成人高等学校有关专业的教科书和从事电力系统运行与管理的工程技术人员的技术参考书。



水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售
北京市地质矿产局印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 17.5印张 536千字
1993年6月第一版 1993年6月北京第一次印刷
印数0001—5990册

ISBN 7-120-01744-6/TM·460

定价 4.80 元

前 言

本教材是根据1988年5月高等学校电力工程类专业委员会审定通过的100学时(含实验)电机学教学大纲编写的。适用于电力技术经济、供用电、高电压技术以及其他有关电力系统运行与管理方面的专业。

本书主要讲述变压器、直流电机、同步电机和异步电机四种类型的电机,以变压器和同步电机为重点。全书重视物理概念的阐述,注意讲清各种电机的基本电磁关系、运行原理和运行特性,对绕组则着重于基本原理,不作详细介绍。对次要内容作了必要的精简。全书体系的安排既考虑了内容由浅入深的原则,又考虑了同步电机要为后继课程打基础的要求,采用了“变、直、同、异”的体系。

本书由北京动力经济学院高之櫟主编、并编写同步电机部分,杨天民编写绪论、变压器部分和异步电机的前三章,赵积善编写直流电机和异步电机的后两章。全书由浙江大学王毓东主审。西安交通大学汪国樑教授、天津大学阎学文教授、东北电力学院杨玉荣教授、华北电力学院施传立教授等都对本书提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。由于作者水平所限,不妥之处在所难免,欢迎指正。

编 者

1993年3月

本书常用主要符号表

a	直流电机绕组并联支路对数 交流电机绕组并联支路数 对称分量法运算中的算子	F_f	励磁磁势
B	磁通密度	F_ϕ	每相磁势的幅值
B_{av}	平均磁通密度	f_ϕ	相绕组磁势瞬时值
$B_{\delta m}$	气隙磁密最大值	f	频率
b_δ	气隙磁密	f_1	基波频率
C_e	感应电势常数		异步电机定子电流频率
C_m	转矩常数	f_2	异步电机转子电流频率
D	直径	f_v	v 次谐波频率
e	电势瞬时值	H	磁场强度
E	电势有效值	i	电流瞬时值
E_m	电势最大值	I	电流有效值
E_1	变压器一次侧电势 异步电机定子电势	I_m	电流最大值
E_2	变压器二次侧电势 异步电机转子电势	I_1	变压器一次侧电流 异步电机定子电流
E_0	空载电势	I_2	变压器二次侧电流 异步电机转子电流
$E_{0'}$	剩磁电势	I_0	空载电流
E_a	电枢电势		零序电流
E_δ	气隙电势	I_a	电枢电流
E_c	导体感应电势	I_d	电流直轴分量
E_T	线匝感应电势	I_q	电流交轴分量
E_k	线圈感应电势	I_k	短路电流
E_b	相电势	I_{Σ}	短路电流直流分量或非周期性分量
E_l	线电势	$I_{\sim}$	短路电流交流分量或周期分量
e_{11}, E_{11}	变压器一次侧漏电势的瞬时值、有效值	I_{st}	起动电流
e_{12}, E_{12}	变压器二次侧漏电势的瞬时值、有效值	I_N	额定电流
F	磁势	I_f	励磁电流
F_1	变压器一次侧磁势 同步电机、异步电机定子磁势	I_+	正序电流
F_2	变压器二次侧磁势 异步电机转子磁势	I_-	负序电流
F_0	空载磁势	I_L	负载电流
F_δ	气隙合成磁势	J	转动惯量
F_a	电枢反应磁势	K	换向器片数
F_{ad}	直轴电枢反应磁势	k	变压器变比
F_{aq}	交轴电枢反应磁势	k_e	电势变比
		k_u	电压变比
		k_i	电流变比
		k_A	自耦变压器变比
		k_{ad}	直轴电枢反应折算系数

k_{aq}	交轴电枢反应折算系数	r_m	激磁电阻
k_{q1}	绕组基波分布因数	R_f	励磁回路调节电阻
k_{y1}	绕组基波短距因数或节距因数	R_s	电枢回路串联电阻
k_{w1}	基波绕组因数	R_m	磁阻
k_m	过载能力	S	容量
k_μ	磁路的饱和系数		绕组元件数
K_{SC}	短路比	S_N	额定容量
L	自感系数	s	转差率
M	电磁转矩	s_m	发生最大转矩时的转差率
	互感系数	t	时间
M_1	原动机拖动转矩或输入转矩	T	周期
M_2	输出转矩		衰减时间常数
M_0	空载转矩	U	电压
M_{max}	最大转矩	U_N	额定电压
M_N	额定转矩	U_S	电网电压
M_{st}	起动转矩	U_G	发电机电压
m	相数	U_+	正序电压
N	导体数	U_-	负序电压
n	转速	U_0	零序电压
n_1	同步转速	ΔU	电压调整率
n_N	额定转速	u_k	短路电压
P_1	输入功率	u_{ka}	短路电压有功分量
P_2	输出功率	u_{kr}	短路电压无功分量
P_M	电磁功率	v	线速度
P_m	机械功率	W_1	变压器一次绕组串联匝数
P_N	额定功率		交流电机定子绕组串联匝数
P_s	比整步功率	W_2	变压器二次绕组串联匝数
p_0	空载损耗		交流电机转子绕组串联匝数
p_{Fe}	铁损	W_k	线圈匝数
p_{Cu}	铜损	x_a	电枢反应电抗
p_m	机械损耗	x_{ad}	直轴电枢反应电抗
p_a	附加损耗	x_{aq}	交轴电枢反应电抗
p_f	励磁损耗	$x_{l1}(x_1)$	变压器一次侧漏电抗
p	极对数		异步电机定子漏电抗
Q	无功功率	$x_{l2}(x_2)$	变压器二次侧漏电抗
q	每极每相槽数		异步电机转子漏电抗
r_1	变压器一次侧电阻	x_k	短路电抗
	异步电机定子电阻	x_m	激磁电抗
r_2	变压器二次侧电阻	x_l	交流绕组漏电抗
	异步电机转子电阻	x_p	保梯电抗
r_a	电枢绕组电阻	x_c	同步电抗
r_D	阻尼绕组电阻	x_d	直轴同步电抗
r_f	励磁绕组电阻	x_q	交轴同步电抗
r_k	短路电阻	x_+	正序电抗

x_-	负序电抗
x_0	零序电抗
x_d'	直轴瞬变电抗
x_d''	直轴超瞬变电抗
y_1	第一节距或后节距
y_2	第二节距或前节距
y	直流机合成节距 交流绕组节距
y_k	换向器节距
Z	电机槽数
Z_1	变压器一次侧阻抗 异步电机定子阻抗
Z_2	变压器二次侧阻抗 异步电机转子阻抗
z_k	短路阻抗值
Z_m	激磁阻抗
Z_L	负载阻抗
Z_+	正序阻抗
Z_-	负序阻抗
Z_0	零序阻抗
α	角度
β	角度
	系数
γ	角度
	电导率

δ	气隙长度
η	效率
η_m	最大效率
θ	功率角 温度
λ	磁导
μ	导磁系数
ν	谐波次数
τ	极距
Φ	电机每极磁通 变压器主磁通
ϕ	磁通瞬时值
Φ_m	主磁通最大值
Φ_0	空载磁通
Φ_l	漏磁通
φ	功率因数角
ψ	磁链瞬时值 内功率因数角
Ψ	磁链
Ω	机械角速度
ω	角频率

右上角标加“*”代表标么值
 右上角标加“'”代表归算值

本书常用主要单位

T	特斯拉
Wb	韦伯
Mx	麦克斯韦
Gs	高斯
Oe	奥斯特
H	亨利
Ω	欧姆
Hz	赫兹
A	安
V	伏
kV	千伏
W	瓦

kV·A	千伏安
kW	千瓦
kvar	千乏
MW	兆瓦
MVA	兆伏安
rad/s	弧度/秒
r/s	转/秒
r/min	转/分
m	米
mm	毫米
N	牛顿
N·m	牛顿·米

树量，连接组别

6极，-1，-1
张新超，——
新海，树量，油里，共解

目 录

1. 所有符号均不参，张新超，变在空，low
2. 变在空，二，三章，大空，张新超

前 言

本书常用主要符号表

本书常用主要单位

绪 论..... 1

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的分类和主要结构..... 9

第一节 变压器的分类 9

第二节 变压器的主要结构 10

第三节 变压器的额定值 12

第二章 变压器的基本原理..... 14

第一节 变压器中各物理量的规定正方向 14

第二节 变压器的空载运行 15

第三节 变压器的负载运行 20

第四节 标么值 24

第五节 变压器的运行性能 25

第六节 变压器参数的测定 29

第七节 变压器空载合闸瞬间的过电流..... 33

第三章 三相变压器..... 38

第一节 三相变压器的磁路系统..... 38

第二节 三相变压器绕组间的极性、引出线标号与联结组别 39

第三节 三相变压器绕组联结方法及磁路系统对感应电势波形的影响..... 42

第四章 变压器的并联运行..... 47

第一节 变压器并联运行的意义及条件..... 47

第二节 变压器并联运行条件的分析..... 47

第五章 变压器的不对称运行..... 54

第一节 对称分量法..... 54

第二节 三相变压器的各相序阻抗、相序等效电路和相序电压方程式..... 56

第三节 Y、yn0联结组三相变压器二次侧单相短路的分析..... 59

第六章 电力系统中常用的其它类型变压器..... 63

第一节 三绕组变压器..... 63

第二节 自耦变压器..... 69

第三节 互感器..... 73

第四节 试验变压器..... 75

第二篇 直 流 电 机

第七章 直流电机的基本原理与结构型式	77
第一节 直流电机的基本原理	77
第二节 直流电机的结构	79
第三节 直流电机的电枢绕组	81
第四节 直流电机的励磁方式	85
第五节 直流电机的型号和额定值	87
第八章 直流电机的磁场、电枢反应和换向	89
第一节 直流电机的空载磁场	89
第二节 直流电机的电枢磁场	90
第三节 直流电机的电枢反应及负载时的磁场	91
第四节 换向	93
第五节 电枢电势和电磁转矩的计算	94
第九章 直流发电机	98
第一节 直流发电机的基本方程式	98
第二节 直流发电机的运行特性	101
第三节 直流发电机运行性能比较	105
第四节 并励发电机的自励过程	105
第十章 直流电动机	108
第一节 直流电动机的基本方程式	108
第二节 直流电动机的运行特性	109
第三节 直流电动机的启动	113
第四节 直流电动机的稳定运行	115
第五节 直流电动机的调速	116

第三篇 同 步 电 机

第十一章 同步电机的结构与基本工作原理	120
第一节 同步电机的基本工作原理	120
第二节 同步电机的基本类型与结构	121
第三节 同步电机的冷却方式	124
第四节 同步电机的励磁方式	126
第五节 额定值	127
第十二章 交流电机的绕组和电势	129
第一节 同步电机的磁路	129
第二节 对交流绕组的基本要求及其结构型式	130
第三节 线圈的电势	131
第四节 三相单层集中整距绕组	134
第五节 绕组的分布因数和短距因数	136
第六节 双层短距分布绕组	139
第七节 三相绕组的接线方式对电势大小和波形的影响	141
第八节 齿谐波电势	141

第十三章	交流电机绕组的磁势	144
第一节	线圈的磁势	144
第二节	单相绕组的磁势	146
第三节	三相绕组的磁势	149
第四节	三相绕组的谐波磁势	154
第五节	漏磁通和漏电抗	156
第十四章	同步电机的基本电磁关系	159
第一节	同步发电机的空载运行	159
第二节	同步发电机在对称负载时的电枢反应	159
第三节	隐极同步发电机的负载运行	162
第四节	凸极同步发电机的负载运行	165
第十五章	同步发电机的运行特性	171
第一节	同步发电机基本特性的定义	171
第二节	同步发电机的空载特性、短路特性和同步电抗的测定	171
第三节	同步发电机的零功率因数负载特性和定子漏电抗的测定	174
第四节	转差法测同步电抗	176
第五节	同步发电机的外特性和调节特性	177
第六节	电压调整率及额定励磁磁势的求法	178
第七节	同步电机的效率和损耗	180
第十六章	同步发电机的并联运行	183
第一节	并联投入的条件和方法	183
第二节	同步发电机的功率和转矩平衡关系	187
第三节	同步发电机与大电网并联运行时有功功率和无功功率的调节	188
第四节	同步发电机的功角特性和静态稳定	191
第五节	同步发电机的振荡和动态稳定的概念	192
第十七章	同步电动机和同步调相机	197
第一节	同步电机的可逆性	197
第二节	同步电动机的运行原理	198
第三节	同步电动机的起动	200
第四节	同步调相机	201
第十八章	同步发电机的不对称运行	202
第一节	同步发电机不对称运行的分析	202
第二节	同步发电机不对称短路的分析	205
第三节	同步发电机不对称运行的影响	207
第十九章	同步发电机的突然短路	209
第一节	超导体闭合回路磁链守恒定律	209
第二节	三相突然短路时的物理过程	210
第三节	瞬变和超瞬变电抗及其测定	214
第四节	突然短路电流的大小及其衰减时间常数	216
第五节	不对称突然短路的概念	218
第六节	突然短路对同步电机及电力系统的影响	219

第四篇 异步电机

第二十章 异步电机的结构与基本工作原理	221
第一节 异步电机的用途、类型和主要结构	221
第二节 异步电动机的额定值	224
第三节 异步电机的基本工作原理、转差率和三种运行状态	225
第二十一章 异步电动机的运行原理	227
第一节 异步电动机在转子不动时的运行情况	227
第二节 异步电动机转子旋转时的情况	229
第三节 异步电动机参数的测定	234
第二十二章 异步电动机的功率、转矩和运行特性	237
第一节 异步电动机的功率传递和转矩平衡	237
第二节 异步电动机的转矩与转差率的关系	238
第三节 异步电动机稳定运行的条件	240
第四节 异步电动机转矩的实用公式	241
第五节 异步电动机的运行特性	242
第二十三章 异步电动机的起动和调速	247
第一节 异步电动机起动的一般问题	247
第二节 笼型电动机的起动方法	248
第三节 绕线型电动机的起动方法	249
第四节 深槽笼型及双笼型异步电动机	251
第五节 附加转矩对起动的影响	253
第六节 异步电动机的调速	254
第二十四章 异步电机的其它运行方式和单相异步电动机	260
第一节 异步发电机的基本原理	260
第二节 感应调压器的基本原理	262
第三节 单相异步电动机的基本原理	264

绪 论

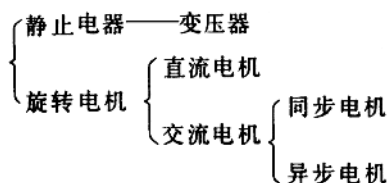
一、电机在国民经济中的作用

电能是应用最广的一种能源，它在生产、输送、分配、控制、使用及其转化为其它形式的能量（例如机械能、热能、化学能等）方面，都具有明显的优越性。在工业、农业、交通运输、文教医疗、国防以及日常生活等国民经济各个部门中，都是不可缺少的。一般说来，任何机械都是能量转换的设备，电机则是机械能与电能互相转换的机械。在电力工业中，电机是各类型（火力、水力、原子能等）发电厂和各级变电站中的主要电气设备。无论是发电、输变电、配电、供用电等都大量采用了各类型电机。

随着科学技术水平的不断提高，现代电力系统正向着超高压（330~750kV）、特高压（750kV以上）、大容量、远距离、自动化方向发展，各种发电、输变电单台设备的容量也不断提高。目前，世界上汽轮发电机单机容量已突破百万kW，变压器单台容量已突破120万kVA。我国已成功制造了60万kW汽轮发电机并于1988年底投入运行。我国自己制造的电力变压器电压等级已达500kV，容量达55万kVA以上。随着国民经济的发展，电力事业必将迅速发展，电机在各个部门中的应用也必然更加广泛。

二、电机的主要类型

从电机的结构与原理来看，可分为下列类型：



从电机的功能来看，又可分为下列类型：

- (1) 变机械能为电能——发电机。
- (2) 变电能为机械能——电动机。
- (3) 一种形式的电能变为另一种形式的电能：

输出与输入电压不同——变压器；

输出与输入波形不同，如交流变直流——变流机；

输出与输入频率不同——变频器；

输出与输入相位不同——移相器。

- (4) 作为控制系统的元件，不以传递功率为主要职能——控制电机、如伺服电动机、自整角机等。

三、电机中常用的材料

电机中常用的材料包括结构材料、导电材料、导磁材料和绝缘材料等。电机的尺寸、

重量、大小、运行性能好坏、损耗、节能效果以及使用寿命长短等经济指标很大程度上取决于其使用的材料。现代新型材料不断涌现，特别是近年来导电、导磁、超导、合金等材料发展很快，绝缘材料品种繁多。下面简单地介绍当前电机制造上最常用的主要材料，并着重分析铁磁材料的特性。

(1) 结构材料。用于制造电机中各个支撑、遮盖和承受机械应力的部件，如外壳、轴、端盖等。结构材料具有机械强度高并且便于加工制造的性能。常用的结构材料有铸铁、铸钢和钢板，在小型电机中也有采用合金钢的。

(2) 导电材料。用于制造电机中各导电部分，如绕组、碳刷、滑环、整流器等。导电材料具有导电率高、抗锈能力强并且便于加工焊接的性能。常用的导电材料有铜、铝、碳石墨等。电工标准铜在 20°C 时的电阻率为 $17.24 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，密度为 $8.9 \text{g}/\text{cm}^3$ ，铝的电阻率为 $28.2 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，密度为 $2.7 \text{g}/\text{cm}^3$ 。

(3) 导磁材料。用于制造电机中各导磁部分，如铁芯、磁轭等。导磁材料具有良好的导磁性能和较低的磁滞涡流损耗，并且易于加工制造。常用的导磁材料有铸铁、铸钢、各种合金钢、电工钢片（硅钢片）等。这些材料称为铁磁材料。

电机和变压器的铁芯采用硅钢片制成，磁路的其他部分则用铸钢和钢板。硅钢片的标准厚度为 0.35mm 、 0.5mm 和 1mm ，其中变压器多采用 0.35mm 硅钢片，一般电机多采用 0.5 或 1mm 硅钢片。硅钢片中含有少量硅（最低含有 0.8% ，最高可达 4.8% ），使它有较高的电阻，同时又有良好的导磁性能。硅钢片有热轧片与冷轧片两种，冷轧片具有更高的导磁性能和较低的损耗，多用于大容量电机和变压器中。

(4) 绝缘材料。用于电机中导体与导体之间、导体与铁芯或导体与外壳之间以及铁芯片之间，起电气绝缘作用。绝缘材料应有较高的介电强度、耐热、耐潮和足够的机械强度。

绝缘材料的使用寿命受温度影响很大，为了保证各种电机正常的使用寿命（一般为20年），对各类绝缘材料都规定了最高允许温度。根据我国的现行标准，即国际电工技术协会（I、E、C）标准，绝缘材料分为O、A、E、B、F、H和C七个等级，其最高允许温度分别为 90°C 、 105°C 、 120°C 、 130°C 、 155°C 、 180°C 及以上。一般电机中最常用的是“E”级和“B”级绝缘材料。由“E”和“B”级绝缘材料构成的绝缘分别称“E”级、“B”级绝缘。

构成“E”级绝缘的主要绝缘材料有各种有机合成树脂制成的绝缘薄膜，如酚醛树脂、环氧树脂和聚酯薄膜等。

构成“B”级绝缘的主要绝缘材料为无机物质，如云母、石棉、玻璃丝和有机粘合物以及浸漆处理过的棉纱、纸、丝、布等为衬底的云母纸、石棉板、玻璃漆布和云母带等。

四、铁磁材料的特性

(1) 导磁性能。为更好地研究电机的磁路和运行性能，下面着重分析铁磁材料的导磁性能，磁滞涡流现象及其所产生的损耗。

铁磁材料的导磁性能可用导磁系数 μ 来表示， μ 的数值愈大，导磁性能就愈好。实验证明铁磁材料的导磁系数要比真空的导磁系数大几百甚至几千倍。例如：生铁、铸钢和硅

钢片的导磁系数 μ_F 与真空的导磁系数 μ_0 的比值分别为200、1000和6000~7000。这是由于铁磁材料内部有磁性分子(偶极子)存在,它本身带有磁性,在一般情况下,即加外磁场前,由于磁性分子排列的杂乱无章,所以对外不显磁性见图0-1(a)。当绕在铁磁材料(如铁芯)外面的绕组通以电流,即加外磁场后,铁芯中磁性分子在外磁场的作用下,逐渐定向排列,如图0-1(b)所示,形成所谓附加磁场。对铁磁材料来说,附加磁场要比外磁场大得多。

在真空中磁通密度 B 与磁场强度 H 呈线性关系,即 $B = \mu_0 H$ ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m), μ_0 是个常数。在铁磁材料中,由于有附加磁场的存在其磁通密度 B 与磁场强度 H 呈非线性关系,即 $B = \mu H$, μ 是个变数。表示 B 与 H 之间函数关系的曲线称为磁化曲线,如图0-2所示。

从铁磁材料的磁化曲线可以看出,在0a段当 H 从零开始增加时, B 呈线性增加,这是由于定向排列的磁性分子的数目随 H 的增加而成比例地增加,使附加磁场成比例地增强的缘故。当磁性分子大部分定向排列整齐时,附加磁场就不再成比例增强,反映在磁化曲线上就出现了ab段的“膝部”的形状。过b点以后,即使 H 再增加,由于磁性分子已基本完全定向排列整齐,不能再产生更大的附加磁场了,因而 B 增加极少,此时出现了磁饱和状态,表现为磁化曲线上b点以后趋近于一条水平线,即磁饱和曲线。饱和曲线上某点与原点连线的斜率就是该点的 μ 值。 $\mu = f(H)$ 的曲线也示于图0-2中。

(2) 磁滞回线。在交流电机中,激磁电流是交变的,因此用铁磁材料制成的铁芯经常处于交变磁化状态。如图0-3所示,当 H 由零上升到某最大值 H_m 时, B 沿磁化曲线0、1上升;当 H 由 H_m 下降到零时, B 不是沿着1、0下降,而是沿着另一条曲线1、2变化。当 H 由零变到 $-H_m$,即进行反向磁化时, B 沿着2、3、4变化。当 H 由 $-H_m$ 上升到零时

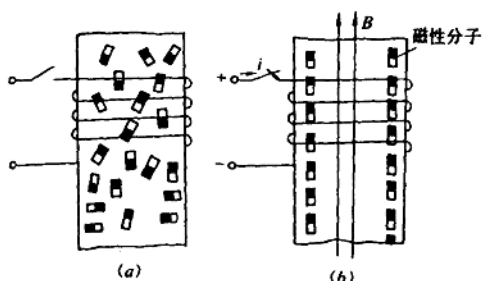


图 0-1 铁磁材料磁性分子分布示意图

(a) 加外磁场前; (b) 加外磁场后

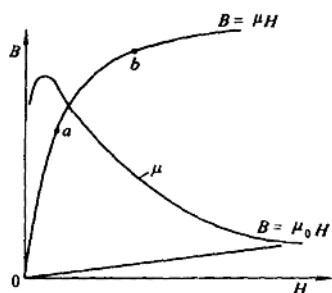


图 0-2 铁磁材料的磁化曲线

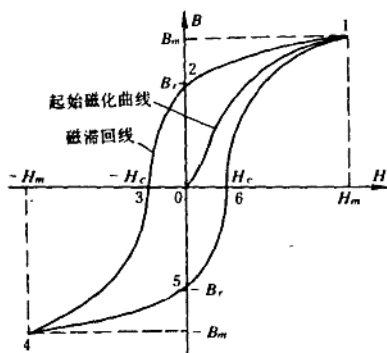


图 0-3 磁滞回线

B 沿4、5变化。当 H 再由零上升到 H_m 时， B 沿着5、6、1上升又几乎回到了1点，这样反复磁化一个循环时就得到了一个闭合回线1、2、3、4、5、6、1称为铁磁材料的“磁滞回线”。图0-3中 B_r 表示 H 为零时的磁通密度，称为“剩磁”， $-H_c$ 表示消除剩磁所需的反向磁场强度，称“矫顽力”。不同的铁磁材料有不同的磁滞回线，同一种铁磁材料，在交变磁化过程中其磁场强度最大值越大，则磁滞回线所包围的面积也越大。同一种铁磁材料在不同的磁场强度最大值下进行磁化时，各条磁滞回线顶点1连接起来所得到的曲线称为“基本磁化曲线”或“平均磁化曲线”，如图0-4所示，它就是电机工程中统称的磁化曲线。

(3) 磁滞损耗与涡流损耗。铁磁材料在交变磁化过程中，其磁性分子之间不停地相互摩擦，因而消耗能量并产生热损耗，这种损耗称“磁滞损耗”，磁滞回线所包围的面积代表磁滞损耗。实验表明，单位质量铁磁材料的磁滞损耗 p_h 与其交变磁化频率 f 成正比，与其磁通密度最大值 B_m 的 a 次方成正比即

$$p_h \propto f \cdot B_m^a$$

式中 a 为常数，对硅钢片，当 $B_m = 1.0 \sim 1.6 \text{ Wb/m}^2$ 时， $a \approx 2$ 。此外当磁通交变时，铁磁材料制成的铁芯内要感应出交变电势，从而产生涡流，如图0-5中虚线即为一片硅钢片中的涡流示意图。涡流消耗能量并产生热损耗，这种损耗称“涡流损耗”。实验表明单位质量铁磁材料的涡流损耗 p_e 与交变磁化频率 f 的平方成正比，与磁通密度最大值 B_m 的平方成正比，与铁磁材料的厚度 d 的平方成正比，与涡流回路的等效电阻 r_e 成反比，即

$$p_e \propto \frac{f^2 B_m^2 d^2}{r_e}$$

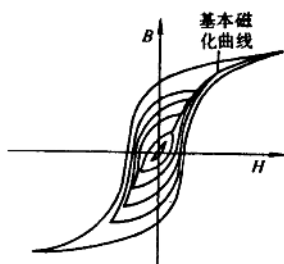


图 0-4 基本磁化曲线

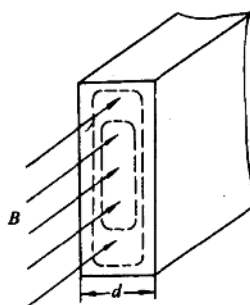


图 0-5 一片硅钢片中的涡流示意图

在电机和变压器中通常把磁滞与涡流损耗合并在一起称为铁芯损耗，简称铁损。铁磁材料单位质量的铁损 p 通常用下式进行计算

$$p = p_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^\beta B_m^2$$

式中 $p_{1/50}$ ——铁损耗系数，表示当 $B_m = 1 \text{ Wb/m}^2$ ， $f = 50 \text{ Hz}$ 时，每千克铁磁材料的铁损。

其值可从铁磁材料性能手册中查出；

β ——铁损耗常数，通常取 $\beta = 1.2 \sim 1.6$ 。

设电机铁芯中总的铁耗为 p_{Fe} 则

$$p_{Fe} = p G_{Fe}$$

式中 G_{Fe} 为铁芯总质量。

五、研究电机时常用的基本电磁定律

1. 电路的欧姆定律

一段电路的欧姆定律可叙述为导体中的电流强度 I 与该导体两端的电压 U 成正比, 与该导体的电阻 R 成反比, 并可用下式来表示

$$\text{对直流电路} \quad I = \frac{U}{R}$$

$$\text{对正弦交流电路} \quad \dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z}, \quad Z = r + jx$$

式中 Z 为正弦交流电路的复数阻抗, r 为正弦交流电路的电阻, x 为正弦交流电路的电抗。

2. 电路的克希荷夫定律

第一定律: 在同一瞬时, 流经电路中任何一个节点的电流的代数和等于零, 且

$$\text{对直流电路} \quad \Sigma I = 0$$

$$\text{对正弦交流电路} \quad \Sigma \dot{I} = 0$$

第二定律: 在同一瞬时, 对电路中沿任一闭合回路绕行一周, 其电动势的代数和等于电压降的代数和, 且

$$\text{对直流电路} \quad \Sigma E = \Sigma U$$

$$\text{对正弦交流电路} \quad \Sigma \dot{E} = \Sigma \dot{U}$$

3. 磁路的欧姆定律

磁路的欧姆定律可叙述为在闭合的磁路中磁通量 ϕ 的大小与作用于该磁路中的磁势 F 成正比与磁路的总磁阻 R_m 成反比, 且

$$\text{对直流磁路} \quad \phi = \frac{F}{R_m}$$

$$\text{对磁通按正弦规律变化的磁路} \quad \dot{\phi} = \frac{\dot{F}}{R_m}$$

4. 磁路的克希荷夫第一定律

磁路的克希荷夫第一定律可叙述为在磁路的任何一个节点上磁通瞬时值的代数和为零, 且

$$\text{对直流磁路} \quad \Sigma \phi = 0$$

$$\text{对磁通按正弦规律变化的磁路} \quad \Sigma \dot{\phi} = 0$$

5. 全电流定律

设空间有 n 根载流导体, 导体中的电流分别为 $I_1, I_2, I_3, \dots$, 如图0-6所示, 则沿磁通 ϕ 的任何一个闭合路径的磁场强度 H 的线积分 $\oint_l H \cdot dl$ 等于该闭合路径所包围的导体电流的代数和 (全电流), 即

$$\oint_l H \cdot dl = \oint_l H' \cdot dl' = \Sigma I$$

这就是全电流定律。式中 ΣI 称全电流, 当导体电流方向与积分路径方向附合右手螺旋定

则时, 电流为正, 反之为负。把全电流定律应用到电机和变压器多段磁路的分析计算中, 可改写为

$$\sum_{k=1}^n H_k \cdot l_k = \Sigma I = WI$$

式中 H_k ——第 k 段磁路的磁场强度;
 l_k ——第 k 段磁路的平均长度;
 $H_k \cdot l_k$ ——第 k 段磁路的磁压降;
 WI ——作用在整个磁路上的磁势;
 n ——磁路总段数。

上式说明, 作用在闭合磁路上磁势的和等于磁压降之和, 因此全电流定律就相当于磁路的克希荷夫第二定律。

6. 电磁感应定律

实验表明, 当线圈中交链的磁通发生变化时, 线圈中就会感应电势, 线圈中每一瞬时的磁通 ϕ 与所有线圈 (W 匝) 均交链时 (如图 0-7 所示), 可得线圈感应电势的瞬时值。

$$e_w = - \frac{d\psi}{dt} = -W \frac{d\phi}{dt}$$

式中 ψ 为磁通链, 简称磁链, $\psi = W\phi$ 。这就是电磁感应定律。

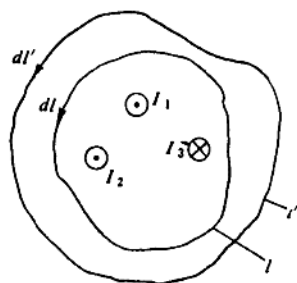


图 0-6 全电流定律

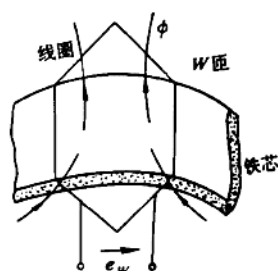


图 0-7 线圈中感应电势的原理图

在变压器和电机的绕组中, 磁链的变化可以是线圈不动, 而磁通随时间在脉动, 或磁通不变, 而线圈在转动。对特种电机还可以是磁通随时间脉动, 而线圈也在转动, 这时线圈中的磁链 ψ 应为 x 与 t 的函数, 即

$$\psi = f(x, t)$$

式中 x 为线圈轴线的瞬时坐标值, t 为时间。则磁链的变化率为

$$d\psi = \frac{\partial \psi}{\partial t} dt + \frac{\partial \psi}{\partial x} dx$$

线圈中的感应电势为

$$e_w = - \frac{d\psi}{dt} = \left(- \frac{\partial \psi}{\partial t} \right) + \left(-v \frac{\partial \psi}{\partial x} \right)$$

式中 $v = \frac{dx}{dt}$ 为线圈中有效导体相对于磁场运动的线速度。

上述等式右边第一项 $\left(-\frac{\partial \psi}{\partial t}\right)$ 称为变压器电势, 以 e_t 表示, 即 $e_t = -\frac{\partial \psi}{\partial t}$ 。第二项 $\left(-v \frac{\partial \psi}{\partial x}\right)$ 称为运动电势, 以 e_v 表示, 即 $e_v = -v \frac{\partial \psi}{\partial x}$ 。

通常在变压器工作中只有变压器电势存在, 即

$$e_w = -\frac{d\psi}{dt} = -W \frac{d\phi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (\psi = W\phi = Li)$$

说明变压器中感应电势的大小与磁链的变化率成正比, 其方向由楞次定律来决定。

在一般直流电机和同步电机工作中, 只有运动电势产生, 即 $e_v = -v \frac{d\psi}{dx}$ 。

为了简便, 可假定线圈中有效长度为 l 的一根直导体, 以线速度 v 在磁通密度 B 为恒定值的磁场中运动, 若 B 、 l 、 v 三者相互垂直, 则该直导体运动电势的大小应为

$$v \frac{d\psi}{dx} = v \frac{a\phi}{dx} = v Bl \frac{dx}{dx} = Blv$$

运动电势的方向由图0-8所示的右手定则决定。

7. 电磁力定律

实验表明载流导体在磁场中要受到力的作用, 这种力称电磁力。若磁场与导体相互垂直, 则作用于导体上电磁力的大小为

$$F = Bli$$

式中 B ——磁通密度, Wb/m^2 ;

l ——导体有效长度, m ;

i ——导体中电流, A ;

F ——作用在导体上的电磁力, N 。

电磁力的方向由左手定则决定, 如图0-9所示。

在图0-8中, 如果外力使导体运动, 则导体中会产生电势, 当导体接通外电路时, 电路

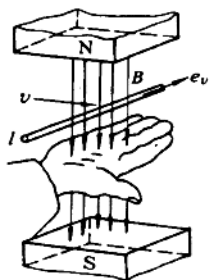


图 0-8 右手定则

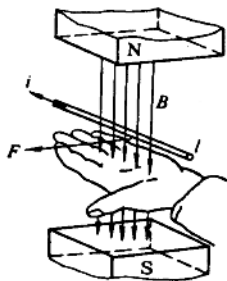


图 0-9 左手定则