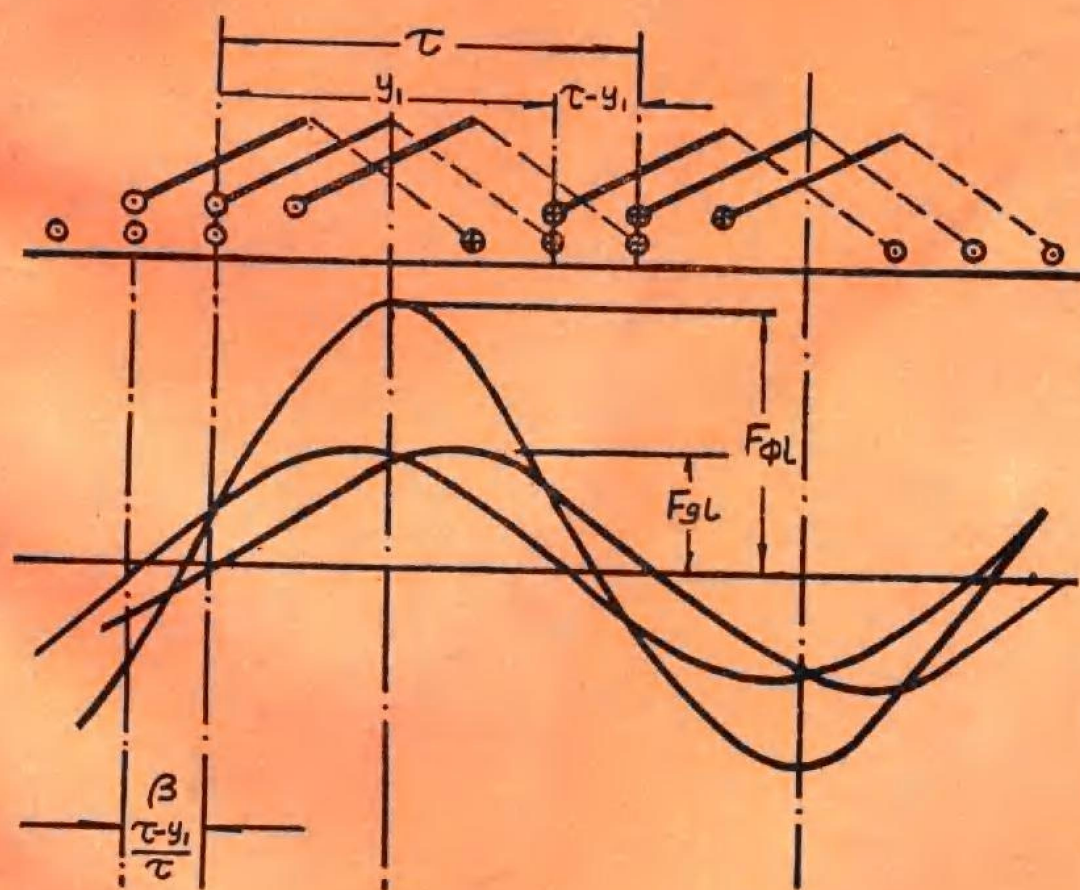


高等专科学校试用教材

电机学

(上册)

邬基烈 主编



上海交通大学出版社

内 容 简 介

全书共四篇,分上、下两册。内容包括绪论、变压器、同步电机、异步电机和直流电机。每章后附有习题,书末附有参考答案。

本书可作高等专科学校、职工大学电力类各专业的教材,也可供大容量机组电气专业技术人员培训班以及中等专业学校及技工学校有关专业师生参考使用。

电 机 学 (上册)

上海交通大学出版社出版

(淮海中路 1984 弄 19 号)

新华书店上海发行所发行

浙江上虞汤浦印刷厂排版

江苏太仓印刷厂印装

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 16.75 字数 409,000

1988 年 11 月第 1 版 1989 年 1 月第 1 次印刷

印数: 1—5,400

ISBN 7-313-00334-X/TM3

科技书目 184-236

定价: 3.30 元



前 言

自1978年本院专科复办以来,各有关部门一直在探讨专科办学的规律。近年来,我们深感要办好专科,办出特色,必须要有合适的教材。为此,我们根据多年来专科教学的经验,编写了这本大专电机学教材。

本书按电力类高等专科教学要求而编写,同时也考虑了电力职工大学的教学要求。采用变压器、同步电机、异步电机、直流电机的顺序。在内容上以变压器为基础,同步机为重点,并根据专业要求适当压缩异步机和直流机内容。本书第一版在1985年写成,由邬基烈副教授编写绪论、同步电机、直流电机三部分并任主编;王余炯老师编写变压器部分;刘思铭高级工程师编写异步电机部分。经在本院和各兄弟院校试用后提出了不少宝贵意见。这次第二版内容在此基础上进行了修改,其中异步电机部分经过上海交通大学林闰汤副教授改写,本院电机教研室陈季权、王如玫两位老师对习题提供了答案。上册由林闰汤副教授主审,下册由江苏电力职工大学汪经武副教授主审。对以上诸位老师,在此谨表示感谢。

由于水平有限,修改过程匆促,错误和不妥之处在所难免。欢迎使用本书的师生、读者继续给予批评指正。

编 者

1988年11月于上海电力学院

目 录

绪论	1
0-1 全电流定律	1
0-2 电磁感应定律	5
0-3 电路定律	8
0-4 电磁力定律	8
0-5 能量守恒原理——机电能量转换过程	9
0-6 电机学的研究方法	12
习题	13

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的基本工作原理和结构	15
1-1 变压器的基本工作原理和分类	15
1-2 变压器的主要结构部件	16
1-3 变压器的发热与冷却	21
1-4 变压器的额定值	23
结语	24
习题	24
第二章 变压器的运行分析	26
2-1 变压器的空载运行	26
2-2 变压器的负载运行	32
2-3 变压器的参数测定	39
2-4 标么值	43
2-5 变压器的运行性能	44
结语	50
习题	51
第三章 三相变压器	56
3-1 三相变压器的磁路系统	56
3-2 绕组的端点标志与极性	58
3-3 三相变压器绕组的接线方式与联接组	59
3-4 三相绕组的联接方式和磁路系统对空载电势波形的影响	62
3-5 三相变压器的不对称运行	64
3-6 V/V联接变压器	73
结语	74

习题	74
第四章 变压器的并联运行	77
4-1 变压器的理想并联条件	77
4-2 变压器变比不等时的并联运行	78
4-3 变压器的联接组别对并联运行的影响	79
4-4 漏阻抗标么值不等时变压器的并联运行	79
结语	81
习题	82
第五章 变压器的瞬变过程	84
5-1 变压器空载合闸时的瞬变过程	84
5-2 变压器副方突然短路时的瞬变过程	87
5-3 变压器的过电压现象	90
结语	93
习题	93
第六章 特种变压器	94
6-1 自耦变压器	94
6-2 三绕组变压器	98
6-3 分裂绕组变压器	102
结语	105
习题	105

第二篇 同步电机

第七章 同步电机的基本知识	107
7-1 同步电机的基本原理	107
7-2 同步电机的基本类型	108
7-3 汽轮发电机的基本结构	109
7-4 水轮发电机的基本结构	115
7-5 同步电机的额定值	118
结语	119
习题	120
第八章 同步电机的电枢绕组及电势	121
8-1 同步电机的磁路	121
8-2 对电枢绕组的要求	123
8-3 导体中的电势	123
8-4 线圈中的电势	126
8-5 线圈组(极相组)的电势	129
8-6 一相绕组的电势	131
8-7 三相单层绕组	133

8-8	三相双层绕组	136
8-9	齿谐波电势和分数槽绕组	139
	结语	142
	习题	143
第九章	电枢绕组的磁势	144
9-1	单只线圈的磁势	144
9-2	单相绕组的磁势,分布、短距对磁势的影响	147
9-3	三相绕组的基波磁势——旋转磁势	150
9-4	椭圆形旋转磁势	154
9-5	三相绕组合成磁势的高次谐波	156
9-6	定子漏磁通	158
	结语	158
	习题	159
第十章	同步电机的对称运行	161
10-1	同步电机的空载运行	161
10-2	对称负载时的电枢反应	163
10-3	隐极同步电机的电势方程式和相量图	168
10-4	凸极同步电机的电势方程式和相量图	174
10-5	电压变化率及其求法	179
10-6	短路特性和短路比	181
10-7	零功率因数负载特性及定子漏抗的测定	183
10-8	同步电机的运行特性	186
10-9	稳态参数的测定	188
10-10	同步电机的损耗与效率	189
	结语	191
	习题	192
第十一章	同步发电机的并联运行	195
11-1	同步发电机并联运行的条件和方法	195
11-2	同步发电机的电磁功率	200
11-3	同步发电机有功功率的调节方法	201
11-4	同步发电机无功功率的调节方法	203
11-5	凸极同步发电机与电网并联运行的特点	205
11-6	同步发电机振荡的概念	206
	结语	208
	习题	208
第十二章	同步电动机及同步调相机	210
12-1	同步电机运行的可逆性	210
12-2	同步电动机的相量图和功角特性	211
12-3	改变励磁电流对同步电动机运行的影响	213

12-4	反应式同步电动机	214
12-5	同步调相机	215
	结语	216
	习题	217
第十三章	同步发电机的突然短路	218
13-1	超导体闭合回路的磁链守恒原理	218
13-2	突然短路时定子绕组电抗的变化	219
13-3	瞬变电抗和超瞬变电抗的测定方法	223
13-4	三相突然短路电流	224
13-5	时间常数	229
13-6	突然短路时对电机及电力系统的影响	231
	结语	232
	习题	233
第十四章	同步发电机的不对称运行	235
14-1	发电机不对称运行的分析	235
14-2	三相同步发电机的不对称稳定短路	238
14-3	负序和零序阻抗的测定	241
14-4	不对称突然短路的概念	242
14-5	不对称运行所产生的影响	243
	结语	244
	习题	245
第十五章	同步电机的励磁方式	246
15-1	对励磁系统的要求	246
15-2	各种励磁方式简介	247
15-3	励磁系统中的中频副励磁机	250
	结语	252
	习题	252
附录		
	习题答案	253

绪 论

电能是能量的一种形式,它和其他形式的能量相比具有无比的优越性,因为它适宜于大量生产、集中管理、远距离传输和自动控制,以及易于转换为其他形态的能量。没有电能,要实现四个现代化是不可想象的,所以电力工业被誉为实行四化的先行。

电机,顾名思义是指和电能有关的器械,即在输入或输出能量中其中有一方为电能;或者两方都为电能,但有不同的电压,或不同的波形,或不同的频率等。鉴于和电能有关的器械在原理上是各种各样的,例如,就电能产生的原理来说,利用电磁感应、光电效应、化学作用、热电效应等都可以产生电能。但是能够大量生产电能的装置,却是以电磁感应为基本原理的那些器械,它们在现代电力生产中起着关键的作用。所以通常所谓的电机并不泛指有关电能的一切器械,而是仅指利用电磁感应原理进行能量转换的那些电机,严格说来,应该正名为电磁机。

电机在电力系统中占有十分重要的地位。发电机是发电站中最主要的设备之一,它使转子转动的机械能转换为电枢绕组上的电能输出,是电力系统的电源。变压器无论对发电站或用户都是必需的,它使不同电压的电能得到变换,以满足发电站和用户不同电压的需要。电动机在发电站内是拖动辅机的主要原动机,这些辅机是电力正常生产所必不可少的;而电动机在电力系统用户中对工农业生产、文教、卫生、日常生活等各方面所起的作用更是无庸赘述了。

从能量转换方式上来看,发电机和电动机是不相同的,前者是由机械能转换为电能,后者则反之。然而在研究电机时,这不应构成电机的分类方法。因为根据电机的可逆性原理,发电机和电动机在运行上是可逆的,两者具有相同的原理,只是具有不同的运行方式。所以从工作原理上来区分,电机可分为交流电机和直流电机两大类,而交流电机又可分为变压器、同步电机、异步电机等几大部分。本课程将按下列次序来讨论:一、变压器;二、同步电机;三、异步电机;四、直流电机。

电机中的能量转换是通过电磁感应作用而实现的,因此对电机进行分析时,当然会涉及到有关电和磁方面的规律。至于遇到哪些具体电磁规律,和我们所须分析的问题有关。一般来说,每台电机必然有电路和磁路,而电路和磁路又是电场和磁场的简化,所以对电机的分析当然会碰到电路(或电场)和磁路(或磁场)方面的问题。通常电机中的电路是指线圈和由许多线圈所组成的绕组;磁路是指磁通所经过的部分,包括磁性材料所组成的部分及有关的空气隙。下面对分析电机所经常会碰到的具体规律分别作一个简单的阐述。

0-1 全电流定律

一、全电流定律

设空间有多根载流导体,其电流分别为 $i_1, i_2, \dots$ (图 0-1), 则沿任意闭合回路 L , 磁场强度 H 的线积分 $\oint_L H \cdot dl$ 恒等于被该闭合回路所包围导体中电流的代数和,即

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i \quad (0-1)$$

这一规律就称为全电流定律。在(0-1)式中,若电流与回路 L 的循行方向符合右螺旋关系,则取电流为正值;反之取为负值,如图 0-1 所示。

图 0-2 表示一个螺管线圈所产生的磁场。由图中可见,对 1、2、3 这三条闭合曲线,线积分 $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l}$ 的值仍与曲线 1 或 2 的线积分值一样,这是因为它们所包含的全电流值相同。这里 $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l}$ 的值并未受到回路长度不同、形状不同的影响,例如对回路 3,这条回路比较长,但因距离线圈较远,磁场强度 $\vec{H}$ 较弱,所以总的来讲, $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l}$ 的值仍与曲线 1 或 2 的线积分值相同。

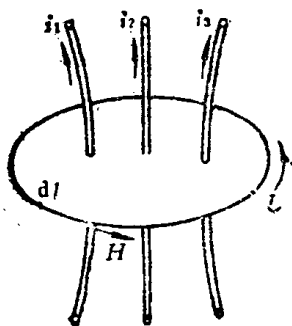


图 0-1 全电流定律

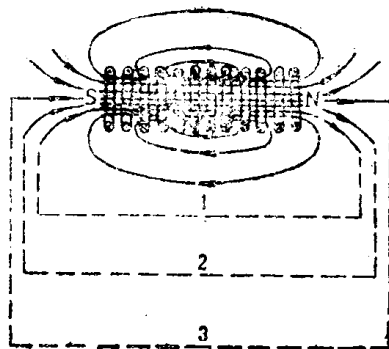


图 0-2 螺管线圈的磁场

磁场强度 $\vec{H}$ 与磁感应强度 $\vec{B}$ (即磁密) 的关系为

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

或

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (0-2)$$

式中, μ 为介质的导磁系数;若 B 的单位为特斯拉, H 的单位为安/米, 则 μ 的单位为亨/米。

μ 的大小与介质的导磁性能有关。对于空气, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨/米;对铁磁物质, μ_F 比 μ_0 大 2000~6000 倍, 且 μ_F 的大小随饱和程度而变化。图 0-3 表示 D11 硅钢片的 $B-H$ 曲线(即磁化曲线)及其 μ_F 随磁场强度 H 的变化情况。

全电流定律在电机中应用极广,它是电机和变压器中磁路计算的基础,交、直流电机电枢绕组的磁势以及气隙磁场的分布均可由全电流定律算出。

二、磁路欧姆定律

如图 0-4 所示,将全电流定律应用于闭合多段磁路,可得

$$WI = \sum_{k=1}^n H_k l_k \quad (0-3)$$

式中, n ——磁路的段路;

H_k ——第 k 段磁路的磁场强度(安/米);

l_k ——第 k 段磁路的平均长度(米);

WI ——被闭合磁路所包围的全电流值,即励磁绕组的安匝数。

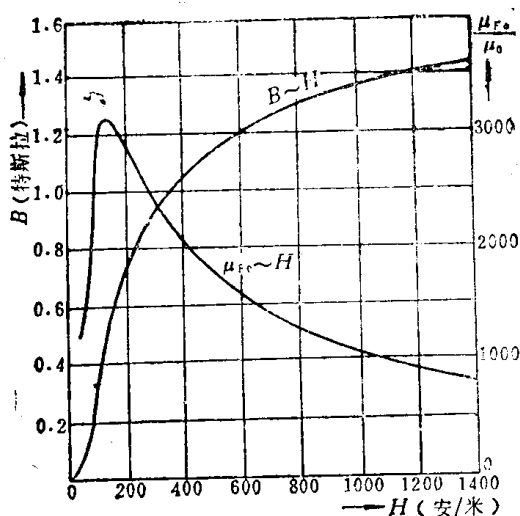


图0-3 D₁₁ 硅钢片的 $B \sim H$ 曲线及 $\mu_{Fe} \sim H$ 曲线

考虑到 $H = \frac{B}{\mu}$, 而磁感应强度 (即磁密) 又等于磁通量除以面积, 即 $B = \frac{\Phi}{S}$, 于是 (0-3) 式

可改写为

$$WI = \Phi \sum_{k=1}^n \frac{1}{\mu_k} \cdot \frac{l_k}{S_k} \quad (0-4)$$

通常把作用于磁路上的励磁安匝数 WI 称为磁路的磁势, 以 F 表示之, $\frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S}$ 称为磁路的磁阻, 以 R_m 表示之; 这样 (0-4) 式可进一步写成如下形式:

$$F = \Phi \sum_{k=1}^n R_{mk}$$

或

$$\Phi = \frac{F}{\sum_{k=1}^n R_{mk}} \quad (0-5)$$

上式表明, 磁路中, 磁通等于作用在磁路上的磁势除以磁路的总磁阻, 这就是磁路欧姆定律。

由于磁阻 $R_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S}$, 所以磁阻主要取决于磁路的几何尺寸和所用材料的导磁系数。磁

路的长度愈长, 截面积愈小, 磁阻就愈大; 材料的导磁系数愈大, 磁阻就愈小。所以电机的磁路要采用铁磁材料。由于 $\mu_0 < \mu_{Fe}$, 在电机的铁心磁路中, 即使有很小的气隙时, 电机的气隙磁阻也可达到相当大的数值, 构成了整个磁路磁阻的主要部分。一般旋转电机, 气隙磁阻常常达到主磁路总磁阻的 70~80%。磁阻的单位是 1/亨。

下面以图 0-4 为例来说明无分支磁路的计算方法。

磁路的计算方法有两种: 一种是已知磁势和磁路的几何尺寸求磁通量, 另一种是已知磁通量和磁路的几何尺寸求磁势。电机和变压器磁路计算的目的常属于后一种, 现对后一种计算方法予以介绍。

例: 如图 0-4 所示, 其中铁心采用 D₁₁ 硅钢片, 其截面积 $S_0 = 9 \times 10^{-4}$ 米², 铁心的平均长度 $l_0 = 0.3$ 米, 空气隙长 $\delta = 0.5 \times 10^{-3}$ 米, 线圈的匝数 $W = 500$ 匝。试求产生磁通 $\Phi = 9.9 \times 10^{-4}$

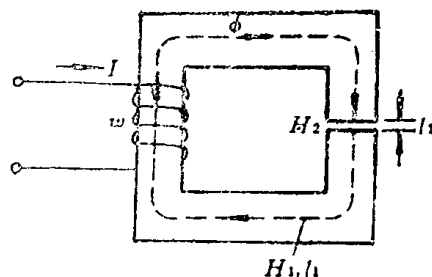


图 0-4 带有气隙的磁路

韦时所需的励磁磁势 WI 和励磁电流 I 。

解：对图 0-4 所示的磁路可分为铁心部分和气隙部分两段，这时(0-3)式变为

$$F = WI = H_c l_c + H_\delta \delta \quad (0-6)$$

式中， H_c 和 H_δ 分别为铁心和气隙中的磁场强度。从(0-6)式可见，如果我们能根据已知条件分别求出 $H_c l_c$ 和 $H_\delta \delta$ ，则磁势 $F = WI$ 即可求出。

对铁心部分，磁场强度 H_c 原则上可按 $H_c = \frac{B_c}{\mu_{F_c}} = \frac{1}{\mu_{F_c}} \cdot \frac{\Phi}{S_c}$ 进行计算，但因铁磁材料的导磁系数不是常数，随铁心饱和程度而异，所以实际工作中不按上式进行计算，而是先根据已知磁通量 Φ 和磁路截面积 S_c 算出磁通密度 B_c ，再根据所用铁磁材料的磁化曲线 $B = f(H)$ 查出与磁通密度 B_c 相对应的磁场强度 H_c ，进而计算出 $H_c l_c$ 之值。

对于图 0-4 的铁心部分，磁通密度为

$$B_c = \frac{\Phi}{S_c} = \frac{9.9 \times 10^{-4}}{9 \times 10^{-4}} = 1.1 \text{ 韦/米}^2$$

由图 0-3 D₁₁ 硅钢片的 $B-H$ 曲线，可查出当 $B_c = 1.1$ 韦/米² 时， $H_c = 475$ 安/米。于是铁心磁压降为

$$H_c l_c = 475 \times 0.3 = 142.5 \text{ 安匝}$$

对于气隙部分，当忽略磁通在气隙两边的边缘效应时，可近似地认为气隙磁通密度与铁心的磁通密度相等，于是气隙磁压降为

$$H_\delta \delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta = \frac{1.1}{4\pi \times 10^{-7}} \times 0.5 \times 10^{-3} = 438 \text{ 安匝}$$

因此产生 $\Phi = 9.9 \times 10^{-4}$ 韦时所需的磁势 WI 为

$$WI = H_c l_c + H_\delta \delta = 142.5 + 438 = 580.5 \text{ 安匝}$$

$$I = \frac{F}{W} = \frac{580.5}{500} = 1.16 \text{ 安}$$

为了更好地理解磁路计算中的各种物理量，表0-1列出了磁场计算与电路计算相对应的物理量。

表 0-1 电路和磁路的对比

电	路	磁	路
电流 I (安)		磁通 Φ (韦)	
电势 E (伏)		磁势 F (安匝)	
电压降 IR (伏)		磁压降 ΦR_m (安匝)	
电阻 $R = \delta \frac{l}{S}$ (欧)		磁阻 $R_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S}$ (1/亨)	
电导 $g = \frac{1}{R}$ (1/欧)		磁导 $\lambda_m = \frac{1}{R_m}$ (亨)	

0-2 电磁感应定律

一、电磁感应定律

设有一匝数为 W 的线圈放在磁场中,不论出于什么原因,例如线圈本身的运动,或者磁场强度本身发生变化等,造成了和线圈交链的磁通 ϕ 随时间发生变化时,线圈内都会感应出电势,这种现象称为电磁感应。如果把感应电势的正方向与磁通的正方向规定得符合右螺旋关系,则感应电势可用下式表示:

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = - W \frac{d\phi}{dt} \quad (0-7)$$

式中, $\psi = W\phi$ 为线圈所交链的磁链。当 ϕ 的单位为韦, t 的单位为秒时,则 e 的单位为伏。

现在用一移动的棒形磁铁使穿过闭合线圈的磁通量发生变化来说明线圈中所感应的电势和电流。如图 0-5 所示,磁铁的右端为 N 极,磁铁的磁场方向向右;根据右螺旋关系,线圈内感应电势的正方向如图中 e 的箭头所示方向。

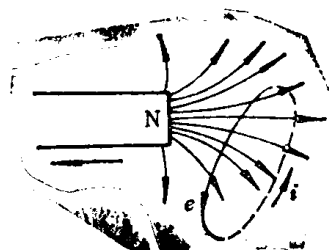


图 0-5 闭合线圈内磁通量发生变化时所产生的感应电势和电流

当磁铁向左移动时,通过线圈内的磁通量逐渐减少, $\frac{d\phi}{dt} < 0$, 故感应电势 $e = - \frac{d\phi}{dt} > 0$, 即感应电势和电流的实际方向与规定的正方向一致,如图中箭头所示方向。当磁铁向右移动时,感应电势和电流的实际方向与规定的正方向相反。

线圈内的感应电流也要产生磁通。不难看出,当磁极逐渐向左移动而离开线圈时,感应电流所产生的磁通将与外来磁极的磁通方向一致,即趋向于保持线圈的总磁通不变。在电磁感应现象中,感应电流的这种作用是普遍存在的,感应电流的作用,使其所产生的磁通恒为阻止原来磁通的变化,这个规律常称为楞次定律。

当导体在恒定的磁场中运动时,若磁场、导体长度和导体的运动方向三者互相垂直,则根据电磁感应定律可以导出,导体内的感应电势应为

$$e = Blv \quad (0-8)$$

式中, e ——导体内的感应电势(伏);

B ——磁场的磁感应强度(特斯拉);

l ——导体在磁场范围以内的长度,称为有效长度,单位为米;

v ——导体的运动速度(米/秒)。

由(0-8)式所产生的电势可称为运动电势,而对于(0-7)式所产生的电势,则称为变压器电势。

(0-8)式的推导过程如下:如图 0-6 所示,若导体 ab 在恒定磁场内运动,在时间 dt 内向下移动了距离 dx ,则整个闭合电路的磁链变化为 $d\phi = - Bl dx$ (负号表示磁链减少),于是导体内的感应电势 e 应为

$$e = - \frac{d\phi}{dt} = Bl \frac{dx}{dt}$$

而 $\frac{dx}{dt}$ 即为导体的运动速度 v , 于是可得 $e = Blv$ 。由于 $Bl dx$ 为导体在每秒内所“切割”的磁力线数, 所以(0-8)式可以理解为: 导体在磁场内运动时所感应的电势就等于每秒内导体所“切割”的磁力线数。

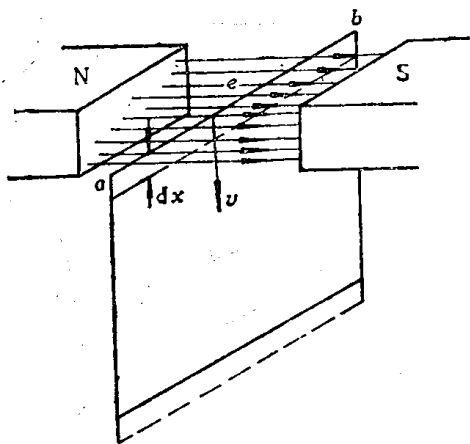


图 0-6 $e = Blv$ 的证明

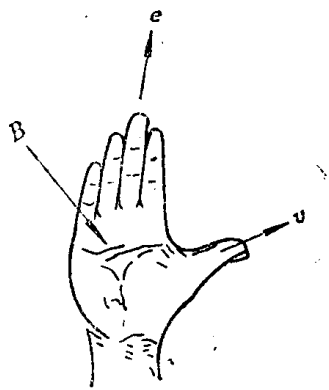


图 0-7 用右手定则确定运动电势方向

运动电势的大小可用 $e = Blv$ 公式算出, 其方向可由右手定则来确定: 把右手掌伸开, 使姆指和其余四指互相垂直, 此时若把掌心对着磁场, 大姆指指向导体运动方向, 于是四指所指方向即为运动电势方向, 如图 0-7 所示。

这里需要指出的是: (0-7)式是电磁感应定律的普遍形式, 而(0-8)式则仅是一种特殊形式, 表明导体在磁场中运动时导体内所感应的电势。

二、自感电势

当线圈中有电流流过时, 载流线圈就会产生磁通。如果电流 i 发生变化, 则磁通 ϕ 也将随之发生变化。根据电磁感应定律, 磁通 ϕ 的变化会在线圈内产生感应电势。这种由于电流自身变化在线圈内所引起的感应电势, 称为自感电势, 以 e_L 表示之。

实验表明, 空心载流线圈的磁链 ψ_L , 应与线圈自身所通过的电流 i 成正比, 比例常数为线圈的自感系数(简称自感), 以 L 表示, 即

$$\psi_L = Li \quad (0-9)$$

用自感表示时, 自感电势可写成

$$e_L = - \frac{d\psi_L}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (0-10)$$

上式说明: 自感电势与线圈的自感和线圈中电流变化率成正比。

由于磁通 ϕ_L 为线圈本身电流所产生, i 和 ϕ_L 之间符合右手螺旋定则; 而自感电势用 $- \frac{d\psi_L}{dt}$ 表示时, e_L 的正方向和 ϕ_L 的正方向之间也符合右螺旋关系, 所以把自感电势写成 $e_L = -L \frac{di}{dt}$ 的形式时, 自感电势的正方向与电流的正方向一致, 如图 0-8 所示。

自感的单位为亨。

从(0-9)式中可知,自感等于单位电流所产生的磁链,即

$$L = \frac{\psi_L}{i}; \text{而磁链 } \psi_L = W\phi_L; \text{磁通 } \phi_L \text{ 又等于磁势 } Wi \text{ 除以磁}$$

阻 R_L ; 于是

$$L = \frac{\psi_L}{i} = \frac{W\left(\frac{Wi}{R_L}\right)}{i} = W^2\lambda_L \quad (0-11)$$

式中, λ_L ——自感磁通所经磁路的磁导(即磁阻 R_L 的倒数);

W ——线圈的匝数。

(0-11)式表示,自感与线圈的匝数平方成正比,与磁路的磁导成正比。匝数愈多,自感就愈大;磁路的磁导愈大,自感也愈大。由于铁磁材料的导磁系数 μ_F ,一般比空气要大几千倍,且 μ_F 不是常值,而是随着磁铁材料的饱和而逐步下降,因此铁心线圈的自感比相应空心线圈的自感要大得多,且随铁心的饱和而减少。

若线圈内的电流为正弦交变电流,即

$$i = I_m \sin \omega t$$

则自感电势应为

$$\begin{aligned} e_L &= -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d}{dt}(I_m \sin \omega t) \\ &= -I_m \omega L \cos \omega t = I_m \omega L \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (0-12)$$

上式指出,自感电势的幅值为 $I_m \omega L$, e_L 的相位滞后电流 i 90° 。

三、互感电势

以下再来讨论互感电势。假定在线圈1附近有一线圈2,通过线圈2的电流 i_2 所产生的磁通中有一部分磁通 ϕ_{21} 与线圈1相链,如图0-9所示,则 i_2 变化时, ϕ_{21} 将在线圈1内引起电势,此电势称为互感电势,以 e_M 表示,

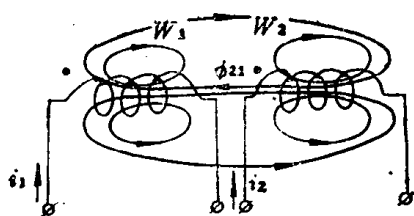


图0-9 互感磁通和互感电势

$$e_{M1} = -\frac{d\psi_{21}}{dt} \quad (0-13)$$

实验表明,若无铁磁物质,则 i_2 愈大,由 i_2 所产生与线圈1相交链的互感磁链 ψ_{21} 也愈大, ψ_{21} 与 i_2 成正比,即

$$\psi_{21} = M i_2 \quad (0-14)$$

比例常数 M 就称为线圈1和2的互感系数,简称互感。从(0-14)式可知,互感 M 等于线圈2中通以单位电流时与线圈1相交链的互感磁链值,即

$$M = \frac{\psi_{21}}{i_2} \quad (0-15)$$

互感的单位也为亨。

由于 $\psi_{21} = W_1 \phi_{21}$, 而互感磁通 ϕ_{21} 等于线圈2所产生的磁势 $W_2 i_2$ 除以互感磁通所经磁路的磁阻 R_{M12} , 于是可得

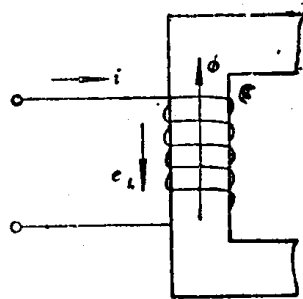


图0-8 自感电势的正方向

$$M = \frac{W_1 \phi_{21}}{i_2} = \frac{W_1 W_2 i_2}{i_2 R_{M12}} = W_1 W_2 \lambda_{12} \quad (0-16)$$

式中, λ_{12} ——互感磁通所经磁路的磁导, $\lambda_{12} = \frac{1}{R_{M12}}$;

W_1 和 W_2 ——线圈 1 和 2 的匝数。

(0-16)式指出:互感与两个线圈的匝数 W_1 和 W_2 的乘积成正比,与磁路的磁导也成正比;线圈的匝数愈多,磁路的磁导愈大,互感就愈大。

将(0-14)式代入(0-13)式,得

$$e_{M1} = -M \frac{di_2}{dt} \quad (0-17)$$

同理,线圈 2 中的互感电势 e_{M2} 应为

$$e_{M2} = -M \frac{di_1}{dt} \quad (0-18)$$

0-3 电路定律

在电路中,对任何闭合电路,若沿某一方向环绕回路一周,则回路内所有电势的代数和应等于所有电压降的代数和,即

$$\sum e = \sum u \quad (0-19)$$

在列回路方程(0-19)式时,应首先规定电流、电势和电压降的正方向;然后选定某一方向环绕回路,凡电势和电压降的正方向与环绕方向一致时取正号,反之则取负号。例如,对图 0-10,沿 $abcda$ 环绕一周,可得

$$e_L = iR - u$$

即

$$u = iR - e_L = iR + L \frac{di}{dt} \quad (0-20)$$

若外施电压 u 和电流 i 均按正弦规律变化,则可写成复数方程式为

$$\dot{U} = \dot{I}R + j\omega L \dot{I} = \dot{I}(R + jX_L) = \dot{I}Z \quad (0-21)$$

式中, $X_L = \omega L$ ——自感电抗;

$\omega = 2\pi f$ ——电流的角频率;

$Z = R + jX_L$ ——阻抗。

在电机和变压器中,由于铁心用硅钢片制成,磁导 λ_m 不是常数,随铁心饱和程度的变化而变化,故自感 L 、自感电抗 X_L 均不是常数。当磁路饱和程度增加时, L 和 X_L 都变小。

0-4 电磁力定律

实验证明,载流导体在磁场中受到力的作用。由于这种力是磁场和电流相互作用所产生,故称为电磁力。若磁场与导体互相垂直,则作用于导体上的电磁力为

$$f = Bli$$

(0-22)

式中, B ——磁场的磁感应强度(特斯拉);

i ——导体中的电流(安);

l ——导体在磁场中的长度(米);

f ——作用在导体上的电磁力(牛)。

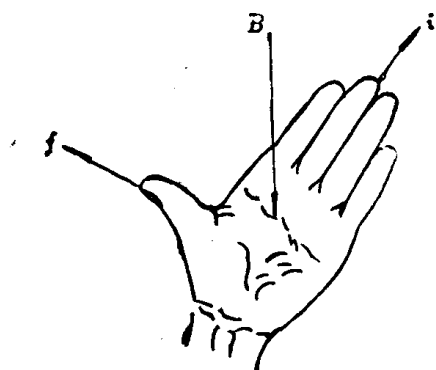


图 0-11 左手定则

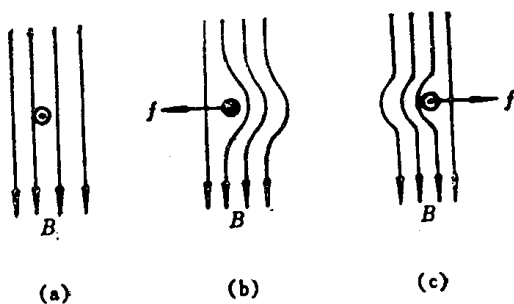


图 0-12 确定电磁力的另一种方法

(a) $i=0$ (b) i 流入纸面 (c) i 流出纸面

电磁力的方向可由左手定则确定:把左手掌伸开,大拇指与其余四指垂直,用掌心对着磁场,四指指向电流方向,则大拇指所指方向即为电磁力方向,如图 0-11 所示。

确定电磁力方向的另一方法是:根据右手螺旋定则画出电流 i 产生的磁力线;把这种磁力线与导体所在处的外磁场叠加,将使导体一边的磁力线增加,另一边减少,则电磁力的方向是以磁力线密的一边指向磁力线疏的一边,如图 0-12 所示。

在旋转电机中,作用于转子导体上的电磁力将使转子受到一个力矩(等于力乘转子半径),这个力矩称为电磁力矩。电磁力矩在电机的能量形态转换过程中起着重要的作用,以后还要详细分析它。

0-5 能量守恒原理——机电能量转换过程

在分析电机时,除了应用上述电磁方面的规律外,还要遵守能量守恒原理。能量守恒是科学上一条基本原理,其含义是:在质量不变的物理系统中,能量总是守恒的,即能量不会凭空产生,也不会凭空消灭,而仅是变换其存在形式。

在电机内部的能量转换过程中,包含了四种形式的能量,即电能、机械能、磁场储能和热能。根据能量守恒原理,这些能量之间具有下列关系:

$$(\text{输入机械能}) = (\text{磁场储能的增加}) + (\text{转换热能的能量损耗}) + (\text{输出电能}) \quad (0-23)$$

在上式中,对发电机来说,电能和机械能都取正号;对电动机来说,电能和机械能都取负号。

在电机内部转换成热量的能量主要有三种:(1)电机绕组和引线内的电阻损耗;(2)由于轴承摩擦和通风而引起的机械损耗;(3)由耦合磁场在铁心中引起的磁滞损耗和涡流损耗,即铁损耗。这三部分能量转换成热量使电机有关部分发热,这是一个不可逆过程,因此,对电能或机械能来说可看作是一种损耗。

如果把上述三种能量损耗分别归并到(0-23)式中的对应项目中去,就可得到下列能量方程:

$$\left[\begin{array}{c} \text{输入的机械能} \\ \text{减去} \\ \text{机械能损耗} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{磁场储能的增加} \\ \text{加上} \\ \text{铁心损耗} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{输出的电能} \\ \text{加上} \\ \text{电阻损耗} \end{array} \right] \quad (0-24)$$

图 0-13 表示与上式相对应的能量平衡图。

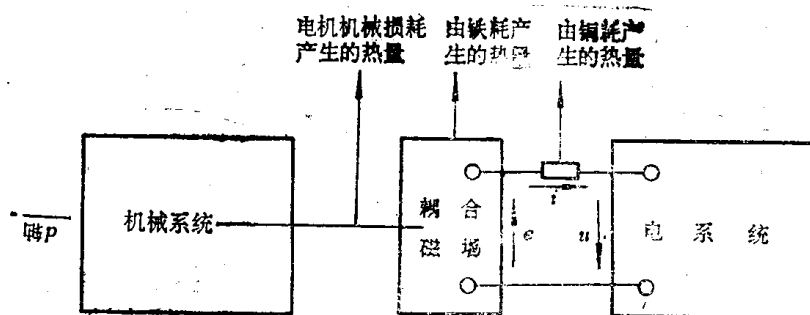


图 0-13 电机中的能量平衡图

用微分形式表示时,(0-24)式可改写为

$$dW_{mec} = dW_m + dW_e \quad (0-25)$$

式中, W_{mec} 是电机输入的净机械能(已扣除机械损耗);

W_m 是耦合磁场吸取的总能量(包括磁场储能和铁心损耗);

W_e 是转换成电能的总能量(包括电阻损耗)。

dW_{mec} 、 dW_m 、 dW_e 为上述各种能量的微分。

从图 0-13 可见,当作发电机运行时, dt 时间内输出的电能为 $uidt$, 而电阻损耗为 $i^2r dt$, 故得

$$dW_e = uidt + i^2r dt = (u + ir)idt = eiddt \quad (0-26)$$

式中, $e = u + ir$ 是电机中耦合磁场在绕组内感应的电势。

从(0-26)式可得通过耦合磁场转换成电能的功率为

$$P_{em} = \frac{dW_e}{dt} = ei \quad (0-27)$$

这个功率称为电磁功率。

从(0-27)式可见,电机的电磁功率 P_{em} (瞬时值) 等于耦合磁场在电机绕组内感应的电势 e (瞬时值)和通过该绕组的电流 i (瞬时值)的乘积。如果 e 和 i 按同频率的正弦变化,则电磁功率的平均值为

$$P_{em} = EI \cos \varphi$$

上式中 E 和 I 分别为 e 和 i 的有效值,而 φ 是它们在时间上的相位差。

当电机有 n 个绕组接到电系统时,电磁功率的普遍形式为

$$P_{em} = \sum_{i=1}^n EI \cos \varphi \quad (0-28)$$

从能量守恒的角度来看,发电机输出的电能量是由机械能量转换过来的,因此,在分析发电机的机电能量转换过程中,还必须研究耦合磁场对机械系统的作用。