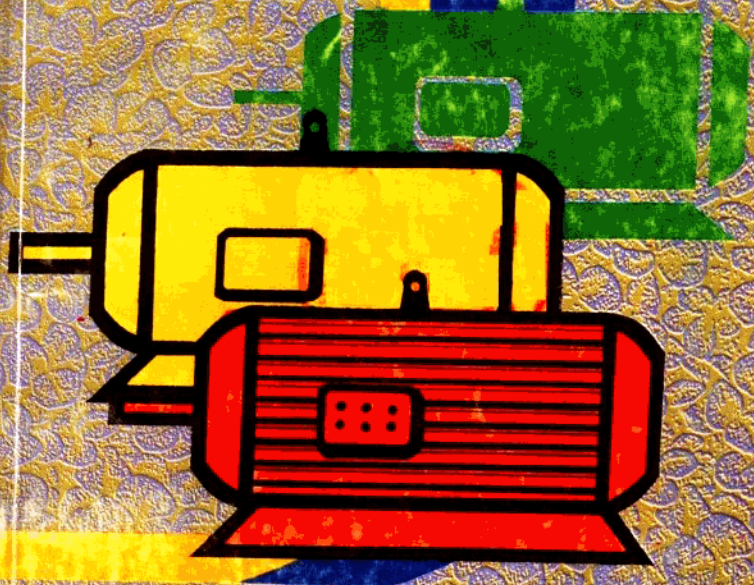


杨学勤 编



电机学 教学指导书

中国电力出版社

电机学教学指导书

杨学勤 编

内 容 提 要

本书是学习电机学课程的辅助读物,与叶水音主编的中等专业学校教材《电机学》密切衔接与配合。书中明确《电机学》中每章内容的教学目的与要求,简要概括了重点内容,解析了难点概念,结合实例指导解题,还附有教材中部分习题的答案。

本书力求对中专学生学习《电机学》课程有所帮助,拓宽思路,以加深对理论分析的理解,避免与教材内容重复。可做电力类大、中专学生的辅助教材,也可供《电机学》课程的任课教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机学教学指导书/杨学勤编. -北京:中国电力出版社,1997

ISBN 7-80125-282-9

I. 电… I. 杨… II. 电机学-专业学校-教学参考资料 N. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 25211 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

三河市水利局印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1997 年 5 月第一版 1997 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 32 开本 5.375 印张 118 千字

印数 0001—2070 册 定价 6.00 元

版权所有 翻印必究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

本书是根据中国电力企业联合会教育培训部教职字[1990]6号文件《1989~1993年电力中等专业学校教材建设规划》(试行),受中等专业学校电力类专业教研会委托,为了与叶水音主编的中等专业学校教材《电机学》配套使用而编写的。电力类教研会电机教学研究组提出了编写的总体构思,审议通过了编写提纲。编者按照中等专业学校教学的特点,针对教材中难以解决而又需要着重阐述的问题作了必要的交待,力求深入浅出,以利于缓解电机课“难教难学”的问题。

本书以教学大纲的规定为依据,具体明确教学目的和要求;以简明的文字强调教学内容中的重点,以不同于教材本身的论述方法阐明教学内容中的难点,剖析学生易发生的误解和易混淆的概念;结合实例指导学生解题;强调电机实验中必须注意的问题;另外,还附有主教材中部分习题的答案,可作为学生学习电机课程的辅助读物,也可作为电机课教师的参考材料。

本书由北京电力高等专科学校杨学勤副教授编写,在编写过程中得到了电机教学研究组侯经枢、谈代秀、叶水音、杨传箭、罗慰擎等同志的关心与支持;本书初稿完成后由杭州电力学校曹鄂澄高级讲师进行仔细审阅并提出了很多宝贵意见。在此一并表示衷心的感谢。

目 录

前 言

第一章	变压器的基本知识及结构	1
第二章	单相变压器的空载运行	3
第三章	单相变压器的负载运行	11
第四章	三相变压器	23
第五章	其它变压器	32
第六章	变压器的运行分析	36
第七章	同步发电机的基本知识及结构	40
第八章	交流绕组及其电动势和磁动势	42
第九章	电枢反应	57
第十章	参数、相量图、特性	64
第十一章	并列运行	79
第十二章	突然短路	95
第十三章	同步发电机的异常运行	100
第十四章	异步电机的基本知识及结构	104
第十五章	异步电动机的运行分析	108
第十六章	起动和调速	117
第十七章	其它异步电机	128
第十八章	直流电机的基本知识及结构	130
第十九章	电枢绕组	132
第二十章	电枢反应及换向	138
第二十一章	直流发电机	145
第二十二章	直流电动机	151
附录	《电机学》各章部分习题 (计算题)	
	参考答案	161

第一章 变压器的基本知识 及 结 构

目 的 要 求

本章的主要内容是阐述变压器的基本原理、类型，介绍电力变压器主要部件的名称与作用、铭牌数据及相关额定值的计算关系。

学习本章内容应能达到以下要求：

- (1) 掌握变压器变压与传递功率的道理。
- (2) 了解变压器主要用途和电力变压器的不同类型。
- (3) 了解电力变压器主要结构部件的名称及作用，重点掌握变压器磁路和电路的特点以及电磁耦合关系。
- (4) 了解变压器铭牌的主要内容、额定值的含义及有关的计算关系。

学习本章内容应尽可能利用实物，有条件的可到变压器制造厂现场教学。

重 点 及 难 点

学习本章时要着重理解并记住一些基本概念和有关数据的确切含意。

- (1) 电磁感应定律是变压器变压与传递功率的理论基础。交变的主磁通耦合具有不同匝数的两个（或是多个）绕组，实现了同频率的电压改变。

(2) 铁芯是用来实现不同绕组间的良好磁耦合的。主磁路必须用硅钢片叠成，以减少涡流损耗。

(3) 三相变压器铭牌标注的额定电压、额定电流均为线值，额定容量为三相功率（视在功率），电压和电流的相值可根据三相绕组的接线方式推算。

综 合 练 习

本章在计算方面的要求是相关额定值的计算。

(1) 三相变压器电压及电流的线、相值关系与接线方式有关。铭牌标注的额定值均为线值，而“额定相值”则应按接线方式换算。在以后的变压器参数性能计算中常用相值，因而这种计算是经常会遇到的。

(2) 额定电压、电流、容量之间的关系是

$$S_N = \sqrt{3} U_N I_N$$

式中 S_N ——额定功率，是指三相视在功率；

U_N 、 I_N ——额定电压、额定电流，均为线值。

上述三个量是相关的，已知其中两个量便可推算另一个量。

(3) 变压器的额定容量按一般定义应为输出的额定功率，输入功率应是输出功率与损耗之和。由于变压器正常运行时功率损耗的相对值与额定功率相比较是很小的，可认为输入功率与输出功率相等，故在推算额定电流时，一、二次侧都可用额定容量计算，这一关系只适用于损耗相对很小的变压器。对于旋转电机，则不能忽略电机的功率损耗。

第二章 单相变压器的 空 载 运 行

目 的 要 求

本章的基本内容是应用电磁理论分析变压器空载运行时各相关电磁量之间的因果关系、数量关系、相位关系，并运用方程式、相量图、等值电路三种分析方法予以表达，在对空载状态具体分析的基础上，明确空载运行时主要电磁量的特点及特定参数。

本章内容属基础理论，三种分析方法对交流电机也具有通用性。因此，学好本章内容对学好变压器乃至电机学这门课程都很重要。学习本章的具体要求是：

- (1) 熟练掌握在正弦电压作用下变压器的空载电流、主磁通及其感应电动势、漏磁通及其感应电动势，它们之间的数量关系、相位关系和波形关系。
- (2) 掌握假定正方向应遵循的原则与作用，熟练地按习惯正方向列写电动势表达式和电动势平衡方程式。
- (3) 熟练掌握用相量图表达各电磁量关系（尤其是相位关系）的方法。
- (4) 牢固掌握并理解空载运行时变压器铁芯内主磁通量的大小只决定于原边所施电压大小的结论，并能用于分析有关的运行问题。
- (5) 深刻理解激磁参数的物理意义及特点，掌握空载运行变压器原边的等值电路。

- (6) 掌握空载电流的大小、性质和波形。
- (7) 掌握变比的定义，变比与电压比的异同点。
- (8) 掌握空载损耗的概念，了解其经济意义。

重点及难点

本章的所有理论都属重点内容。空载运行时电磁过程的分析、电动势与磁通的关系、参考方向的选定、电动势方程式的写出、等值电路的推导及各阻抗参数的物理意义、空载电流及空载损耗的分析等都是重要的理论内容。对这些基本概念应有深刻的理解，但也应避免对枝节问题过细的纠缠，如对计算铁损的经验公式、附加损耗、空载电流的波形分析问题，有一般了解即可。

学习本章内容要着重理解以下问题：

(1) 各电磁量的参考方向，原则上可以任意假定。通常选用习惯正方向，有统一、方便的好处。如果选用的参考方向不是习惯正方向，那么在列写表达式、方程式时必须标明各物理量的正方向，否则无法确认表达式、方程式是否正确。

(2) 变压器空载时的主磁通量、激磁电流与外施电压、磁路磁阻间的关系分析如下：

从磁路角度看，激磁电流产生的磁动势、主磁通、铁芯回路的磁阻三者之间的关系应附合磁路欧姆定律。从电路角度看，外施电压、激磁电流、激磁阻抗三者之间的关系，应符合电路欧姆定律。实际的变压器铁芯磁阻及其对应的激磁阻抗并不是常量，它们都与磁路的饱和程度有关，也就是与磁通密度的大小有关，这是分析电磁过程必须注意的一个特点。又由回路定律可知，外施电压总是与主磁通感应的电动

势相平衡（忽略微小的漏阻抗压降），感应电动势又与主磁通量成正比关系，故有主磁通量与外施电压成正比的近似关系，这是电磁作用关系的又一个特点。

掌握以上两个特点就可以正确地分析各电磁量之间的关系。如果磁路的构成条件一定，当外施电压升高时，则主磁通量将与之成正比地增加，若磁通量的增加使铁芯饱和程度加深，则磁阻增大，故激磁电流增加的倍数将超过磁通量增加的倍数。如果外施电压一定时，那么主磁通量必为定值，当磁路结构发生变化时，磁阻亦将改变，从而影响激磁电流的大小。如铁芯磁阻增大时（如加大接缝），激磁电流将与磁阻成正比地增加。

(3) 主磁通感应的电动势 $\dot{E}_1 = -j4.44f\Phi_m N_1$ ，漏磁通感应的电动势 $\dot{E}_{o1} = -j\dot{I}_0 X_1$ 。同是交变磁通产生的感应电动势，但常用的表达形式不同。这是因为主磁通的磁路是铁芯，其磁导率的大小与磁通密度的大小有关，对应的电抗值不是常量，因而把 E_1 写成电抗压降形式不具有普遍意义。漏磁通的磁路磁阻主要决定于油或空气等非磁性物质，其磁导率大小与磁通密度的大小基本无关，相应的电抗值是常量。将漏电动势写成压降形式，在电路计算时较为方便。主磁通感应的电动势在特定条件下（如 $U_1 = U_{N1}$ ）也可写成压降形式（ $\dot{E}_1 = -j\dot{I}_0 Z_m$ ，式中 Z_m 为额定电压时的特定值），但该式只能用于计算外施电压为额定值时的感应电动势。

(4) 变压器的激磁阻抗与外施电压的关系分析如下：据 $U_1 \approx E_1 = 4.44f\Phi_m N_1$ 关系可知，当 f 、 N_1 为定值时，若 U_1 增大，则 Φ_m 与之成正比地增加， I_0 将按磁化曲线关系增加。故当磁路饱和时， I_0 增加的程度将大于 U_1 增高的程度。由关系

式 $U_1 = E_1 = I_0 Z_m$ 可见, U_1 提高时, 因磁路饱和的影响 Z_m 将减小。

$Z_m = r_m + jx_m$, 当 U_1 提高时, r_m 、 x_m 各将如何变化呢? 现以额定电压为 35kV 的变压器接至电压为 60kV 电源为例, 具体讨论如下:

当变压器接至电压为 35kV 电源时, 主磁通为 Φ_m 、空载电流为 I_0 , 激磁阻抗为 $Z_m = r_m + jx_m$ 。当变压器接至电压为 60kV 电源时, 主磁通增加, $\Phi'_m = \frac{60}{35} \Phi_m = \sqrt{3} \Phi_m$, 磁密 $B'_m = \sqrt{3} B_m$, 这时铁芯的饱和程度将加深, 使磁导率 ν 变小, 则激磁电抗 x_m 变小。铁耗约与磁密的平方成正比, 磁密增至 $\sqrt{3}$ 倍时, 铁耗约增至 3 倍。在深度饱和条件下, 激磁电流 I'_0 远大于 $\sqrt{3} I_0$, 由铁损与等效电阻 r_m 的关系 $p_{Fe} = I_0^2 r_m$ 可知, 当外施电压提高至 $\sqrt{3}$ 倍时, 铁耗增至 3 倍, 空载电流 I'_0 增加的程度远大于 $\sqrt{3}$ 倍, 因而等效电阻 r_m 也必定减小。以上讨论说明, 提高电压运行时, 变压器的激磁阻抗 Z_m 、激磁电抗 x_m 、激磁电阻 r_m 都是减小的。

(5) 在变压器空载运行的等值电路中有漏阻抗 $Z_1 = r_1 + jx_1$ 和激磁阻抗 $Z_m = r_m + jx_m$ 。比较阻抗参数的特点很重要。 r_1 是一次绕组导线电阻, r_m 是反映铁损的等效电阻, 是假想的而并非实有的电阻。 x_1 是与一次绕组漏磁通对应的电抗, x_m 是与主磁通对应的电抗 (含铁损的影响)。两类阻抗参数的重要差别在于漏抗与外施电压大小无关, 是常数; 激磁阻抗与外施电压大小有关, 不是常数。

(6) 变压器的空载电流很小, 在电力变压器中, 一般小于额定电流的 10%。这是因为主磁路为导磁性能很好的铁芯, 当绕组接通电压时, 很小的激磁电流就可产生足够的磁

通量，以感生与外施电压相平衡的电动势。

变压器的空载电流主要是磁化电流，因铁耗的存在，空载电流中也含有有功分量，一般有功分量远小于磁化作用的感性无功分量，故空载时的功率因数很低。

变压器空载运行时既消耗有功功率，也消耗无功功率，有功功率的消耗降低了电力系统的运行效率，无功功率的消耗降低了系统的功率因数，因而空载运行方式是不合理的，应尽量避免。

(7) 空载电流的波形分析。因空载电流主要是磁化电流，在单相变压器中，其波形与磁路饱和程度有关。当磁路饱和时，产生正弦波形主磁通的激磁电流是尖顶波形，而正弦波形的激磁电流只能产生平顶波形的主磁通。在以后的分析中可知，三相变压器的激磁电流、主磁通的波形分别受三相绕组的接线方式及三相磁路的构成形式等条件的制约。

(8) 变压器空载运行时原边电流产生的磁通分为两部分：沿铁芯回路闭合的主磁通和经空气或变压器油等非磁性介质闭合的漏磁通。比较两者的异同，有助于加深对变压器电磁过程的深入了解。两者的相同点主要是：①两部分磁通均为原边电流（磁通势）产生；②均为交变磁通且频率相等，故原绕组的这两部分交变磁链都产生相应的感应电动势。两者的不同点主要是：①主磁通的磁路为导磁系数很大的铁芯，漏磁通的磁路主要是非导磁性的油或空气等；两部分磁通的磁路因磁阻相差很大，故磁通量也相差很大，对应的感应电动势大小亦有明显差别；空载运行的变压器漏电动势一般不大于主磁通感应电动势的 0.5%。②主磁通磁路为铁磁物质，具有饱和特性，对应的电抗参数随磁路的饱和程度而变；漏磁通磁路的磁阻主要决定于非磁性物质，对应的电抗参数为常量。③主磁通不仅对原边形成交变磁链，同时也对副边形

成交变磁链，因而主磁通在两个（或多个）绕组内均产生感应电动势。副边的感应电动势是变压器向负载电路输出功率的必要条件，可见主磁通是变压器传递电功率的关键因素。漏磁通不与副绕组相链，因而它没有传递电功率的作用，只在原绕组电路中产生漏抗压降。

(9) 频率变化对变压器电磁过程的影响。假定变压器的外施电压、绕组匝数为一定值，当频率改变时将会影响主磁通量的大小、激磁电流的大小；这时激磁电抗的大小也有变化。具体分析如下：

当频率降低时，由 $U_1 = E_1 = 4.44f\Phi_m N_1$ 关系可知，主磁通 Φ_m 应增加。主磁通 Φ_m 的增加直接引起激磁电流的增大，且因此时铁芯的饱和程度加深，更加剧了激磁电流的增大。激磁电抗 $x_m = 2\pi fL_m$ ，当频率 f 降低时，直接引起电抗 x_m 减小，又因磁路饱和程度加深， L_m 随之减小，更加使 x_m 减小。

(10) 变比 K 定义为相电动势的比值，也等于相绕组匝数比，近似等于额定相电压的比值。因为空载时原边漏阻抗压降很小，以电压比代替变比不会有很大的误差。

对于三相变压器，额定电压为线电压，电压比是线电压的比值，必须按具体的接线方式（Y 或 Δ ）将线电压换算成相电压才可求得变比 K 。

综 合 练 习

(1) 本章内容中应掌握的计算题主要是计算绕组匝数、变比和空载电压。变压器空载时，有 $U_1 \approx E_1 = 4.44f\Phi_m N_1$ ， $U_2 = E_2 = 4.44f\Phi_m N_2$ ， $\frac{E_1}{E_2} = K$ 及 $\Phi_m = B_m S$ 等关系式。一般 f 为

已知量,若给定 Φ_m 、 U_1 、 U_2 ,则可计算 N_1 及 N_2 ,还可按给定的 U_1 、 N_1 (或 U_2 、 N_2) 计算 Φ_m (或 B_m)。

【例 2-1】 一台额定容量为 10500kVA 的单相变压器,额定电压为 35/6.6kV, $f_N=50\text{Hz}$, 铁芯截面积 $S=0.158\text{m}^2$, 铁芯最大密度 $B_m=1.415\text{T}$ 。试计算高、低压绕组的匝数,每匝电动势及变比。

解:先计算正弦交变磁通量的幅值 $\Phi_m=B_m \cdot S=1.415 \times 0.158=0.2236\text{Wb}$ 。按额定电压的规定可知,空载电压为 $U_1 \approx E_1=35\text{kV}$, $U_2=E_2=6.6\text{kV}$, 再按每匝电动势 $E=4.44f\Phi_m=49.63\text{V}$, 便可计算高、低压绕组的匝数 $N_1=\frac{E_1}{E}=705$ 匝, $N_2=\frac{E_2}{E}=133$ 匝, 变比 $K=\frac{N_1}{N_2}=5.3$ 。

(2) 按给定的正方向惯例列写电压方程式、画等值电路和相量图,是研究变压器及交流电机的三种常用方法,熟练地掌握这三种方法对学好电机课乃至后续的专业课都是至关重要的。在本章内容中已全面应用了这三种方法,学习时需多作练习,以加深理解并熟练掌握。

现以图 2-1 示出的假定正方向为例,用三种方法表达各电磁量之间的关系,应有如图 2-1 所示形式。

感应电动势表达

式

$$\dot{E}_1 = j4.44f\dot{\Phi}_m N_1$$

因为感应电动势的正方向是按反右螺旋关系确定的,故 $e=\frac{d\phi_1}{dt}$ 。

同理 $\dot{E}_{o1} = j\dot{I}_{o1} x_1$

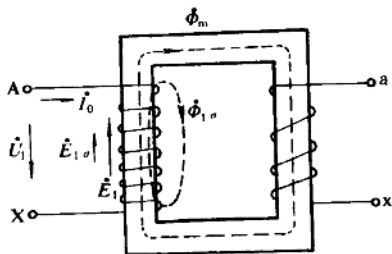


图 2-1 假定正方向

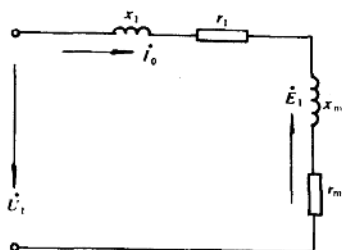


图 2-2 导值电路图

电动势方程式

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{E}_{o1} + \dot{I}_0 r_1$$

$$= \dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1$$

其等值电路如图

2-2 所示。

相量图如图 2-3 所

示。将 $\dot{E}_1 = j4.44f$

$\dot{\Phi}_m N_1$ 改写为激磁阻抗

压降形式时，由于 $\dot{I}_0$ 与 $\dot{\Phi}_m$ 的正方向仍为右螺旋关系，故有

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m$$

$$= \dot{I}_0 (r_m + jx_m)$$

则电压方程式可写成

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 Z_m + \dot{I}_0 Z_1$$

$$= \dot{I}_0 (r_m + r_1) + j \dot{I}_0 (x_m + x_1)$$

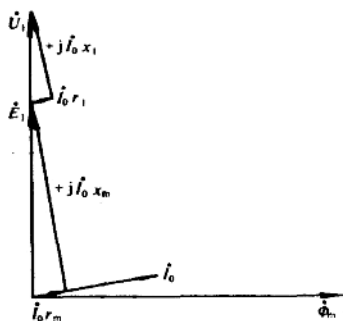


图 2-3 相量图

第三章 单相变压器 的负载运行

目 的 要 求

本章内容涉及变压器基本电磁理论和基本分析方法。通过对负载运行时磁通势平衡关系的分析,可以明确变压器是如何传递电功率的。对 $K \neq 1$ 的实际变压器进行折算,可以获得等值电路,从而获得变压器实用的基本方程式、相量图。学习本章内容的要求是:

(1) 牢固掌握变压器的磁势平衡关系,理解副边电流通过其磁势影响原边电流的道理。

(2) 明确折算的目的,掌握折算的原则和方法。

(3) 能熟练地应用折算后的方程式、相量图和等值电路表达和解析各电磁量的关系。

(4) 牢固掌握变压器短路参数的概念,能熟练地应用负载试验数据计算短路阻抗。

(5) 牢固掌握空载实验的目的、原理及测试方法。

(6) 了解标么值的概念,熟悉用标么值进行计算的基本方法。

(7) 了解变压器的运行特性,熟悉电压调整率及运行效率的计算。

重点及难点

变压器的磁通势平衡关系和折算是本章内容的重点，也是难点。

(1) 变压器负载运行时的磁通势平衡关系要着重从以下三个方面加深理解。

1) 磁通势平衡关系的物理概念。变压器二次绕组的电动势是由主磁通感应产生的，负载运行时二次绕组中的电流产生的二次磁通势必然对主磁通发生影响。若主磁通发生变化，则将引起一次绕组反电动势的变化，从而导致一次侧电流的相应变化。定性地分析表明，二次电流的存在必然要引起一次侧相应电流分量的变化。

2) 定量分析。写出磁通势平衡方程式，其条件是在正常运行时变压器的主磁通量基本不变。由磁通势平衡关系得出，一次侧电流（磁通势）是由两部分组成的，即：激磁分量电流（磁通势），其作用是产生主磁通；负载分量电流（磁通势），其作用是平衡二次侧电流（磁通势）。其数学表达式为 $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2/K)$ 。

3) 负载运行的变压器二次侧电流与一次侧电流的负载分量之间的依存关系，表征了变压器具有传递电功率的作用。两个并无电连接的绕组之间存在电流（功率）依存关系的条件是磁的耦合，可见主磁通是传递电功率的关键因素，这是变压器工作的一个重要原理。

(2) 折算可以理解为将被折算的实际绕组以一个假想绕组（匝数与另一侧相等）等效代替的折合算法。如果将低压侧折算至高压侧，这时假想的等效绕组的匝数为实际绕组匝