



高等教育学习辅导丛书

电机学同步训练

严震池 编

GAODENGJIAOYU XUEXI FUDAO CONGSHU

中国电力出版社

高等教育学习辅导丛书

电机学同步训练

严震池 编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书是为了满足广大师生对《电机学》课程的教学要求而编写的辅助用书,目的在于帮助学生理解掌握《电机学》的主要内容,掌握本课程的学习方法和问题的分析思路,解答疑难问题。

本书分变压器、异步电机、同步电机、直流电机四篇,主要包括变压器基本工作原理和结构,单相变压器运行原理及运行特性,三相变压器,变压器运行,其他变压器,交流电机绕组、电动势及磁动势,三相异步电动机基本工作原理和结构,三相异步电动机运行原理及工作特性,三相异步电动机启动和调速,三相异步电动机在不对称电压下运行及单相异步电动机,三相同步发电机基本工作原理和结构,三相同步发电机运行原理及运行特性,三相同步发电机的并联运行,同步发电机三相突然短路,三相同步发电机的不正常运行,直流电机基本工作原理和结构,直流电机基本理论,直流电机运行原理等。

本书可作为各层次《电机学》课程的教学辅助用书,也可作为自学考试、研究生入学考试的复习参考书。同时可供电力系统技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

电机学同步训练/严震池编. —北京:中国电力出版社, 2003
(高等教育学习辅导丛书)
ISBN 7-5083-1642-8

I. 电… II. 严… III. 电机学-高等教育-习题 IV. TM3-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 055622 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市铁成印刷厂印刷

*

2003 年 11 月第一版 2003 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.5 印张 438 千字

印数 0001—3000 册 定价 30.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,请与当地教材供应部门联系)

前 言

本书是为了满足广大师生对《电机学》课程的教学要求而编写的辅助用书，目的在于帮助学生理解掌握电机学的主要内容，掌握本课程的学习方法和问题的分析思路，解答疑难问题。

本书分变压器、异步电机、同步电机、直流电机四篇，主要内容包括变压器基本工作原理和结构，单相变压器运行原理及运行特性，三相变压器，变压器运行，其他变压器，交流电机绕组、电动势及磁动势，三相异步电动机基本工作原理和结构，三相异步电动机运行原理及工作特性，三相异步电动机起动和调速，三相异步电动机在不对称电压下运行及单相异步电动机，三相同步发电机基本工作原理和结构，三相同步发电机运行原理及运行特性，三相同步发电机的并联运行，同步发电机三相突然短路，三相同步发电机的不正常运行，直流电机基本工作原理和结构，直流电机基本理论，直流电机运行原理等。

本书采用一般教材的结构，以章为单位，每章设有“内容提示”“同步练习”“习题解答”“参考答案”四部分。“内容提示”以节为单位，对该章的重点、要点内容总结归纳，并对重点、难点内容提示分析思路、学习方法；“同步练习”针对本课程各知识点编写了各种类型的练习题；“习题解答”给出《电机学》中的一些重点、难点习题的答案；“参考答案”给出“同步练习”中所有练习题的参考答案。最后给出三套模拟试卷，可用于学生检查学习效果。

本书由严震池编写。由于作者水平有限，书中不妥和错漏之处，恳请广大师生和读者给予批评指正。

编 者

2003 年 6 月

目 录

前言

第一篇 变 压 器

第一章 变压器基本工作原理和结构	1
第一节 变压器基本工作原理及分类	1
第二节 变压器结构简介	2
第三节 变压器的型号和额定值	2
同步练习	3
习题解答	4
参考答案	5
第二章 单相变压器运行原理及运行特性	6
第一节 单相变压器的空载运行	6
第二节 单相变压器的负载运行	12
第三节 变压器参数的测定	17
第四节 标么值	21
第五节 变压器运行特性	22
同步练习	24
习题解答	29
参考答案	39
第三章 三相变压器	50
第一节 三相变压器的磁路系统	50
第二节 三相变压器的电路系统	50
第三节 绕组连接方式和铁心结构对空载电动势波形的影响	56
同步练习	58
习题解答	60
参考答案	62
第四章 变压器运行	66
第一节 变压器的并联运行	66
第二节 三相变压器的不对称运行	67
第三节 变压器的暂态过程	68
同步练习	71
习题解答	73
参考答案	76

第五章 其他变压器	78
第一节 三绕组变压器	78
第二节 自耦变压器	79
第三节 分裂变压器	80
同步练习	81
习题解答	82
参考答案	84

第二篇 异步电机

第六章 交流电机绕组、电动势及磁动势	85
第一节 交流绕组简介	85
第二节 交流绕组基波电动势	87
第三节 交流绕组基波磁动势	90
同步练习	92
习题解答	94
参考答案	99
第七章 三相异步电动机基本工作原理和结构	102
第一节 三相异步电动机基本工作原理及分类	102
第二节 三相异步电动机基本结构	103
第三节 异步电动机型号和额定值	104
同步练习	104
习题解答	105
参考答案	109
第八章 三相异步电动机运行原理及工作特性	111
第一节 转子不转时的状况分析	111
第二节 转子旋转时的状况分析	113
第三节 等效电路	114
第四节 电磁转矩和 $T_{em} - s$ 曲线	116
第五节 三相异步电动机工作特性	120
同步练习	121
习题解答	124
参考答案	128
第九章 三相异步电动机起动和调速	133
第一节 三相异步电动机的起动	133
第二节 双鼠笼式和深槽式异步电动机	136
第三节 三相异步电动机的调速	137
第四节 电磁调速三相异步电动机	138
同步练习	139
习题解答	141
参考答案	144

第十章 三相异步电动机在不对称电压下运行及单相异步电动机	147
第一节 三相异步电动机在不对称电压下运行	147
第二节 单相异步电动机	147
同步练习	149
习题解答	149
参考答案	150

第三篇 同步电机

第十一章 三相同步发电机基本工作原理和结构	151
第一节 三相同步发电机基本工作原理及分类	151
第二节 汽轮发电机结构简介	152
第三节 同步发电机型号和额定值	153
第四节 同步发电机励磁方式简述	154
同步练习	154
习题解答	154
参考答案	155
第十二章 三相同步发电机运行原理及运行特性	157
第一节 同步发电机的空载运行	157
第二节 对称负载时的电枢反应和电磁转矩	158
第三节 漏抗、电枢反应电抗和同步电抗	162
第四节 同步发电机电势方程式及相量图	165
第五节 同步发电机运行特性	168
第六节 同步发电机的损耗及效率	172
同步练习	172
习题解答	175
参考答案	181
第十三章 三相同步发电机的并联运行	187
第一节 同步发电机的并列	187
第二节 同步发电机有功功率调节和静态稳定	189
第三节 同步发电机无功功率调节和 V 形曲线	197
第四节 调相运行及调相机	201
同步练习	202
习题解答	205
参考答案	216
第十四章 同步发电机三相突然短路	221
第一节 超导回路的磁链守恒原理	221
第二节 三相突然短路时的同步电抗	221
第三节 三相突然短路电流	224
同步练习	230
习题解答	231

参考答案	233
第十五章 三相同步发电机的不正常运行	235
第一节 三相同步发电机的不对称运行	235
第二节 同步发电机的失磁运行	237
第三节 同步发电机的进相运行	237
第四节 同步发电机的振荡	238
同步练习	239
习题解答	239
参考答案	242

第四篇 直 流 电 机

第十六章 直流电机基本工作原理和结构	244
第一节 直流电机基本工作原理及分类	244
第二节 直流电机基本结构	246
第三节 电枢绕组简介	247
第四节 直流电机型号和额定值	248
同步练习	248
习题解答	249
参考答案	250
第十七章 直流电机基本理论	252
第一节 电枢电动势及电磁转矩	252
第二节 电枢反应	254
第三节 换向概述	256
同步练习	257
习题解答	258
参考答案	260
第十八章 直流电机运行原理	262
第一节 直流电机基本方程	262
第二节 直流发电机	264
第三节 直流电动机	266
同步练习	270
习题解答	272
参考答案	275
全国高等教育自学考试电机学模拟试卷 (A)	278
全国高等教育自学考试电机学模拟试卷 (B)	283
全国高等教育自学考试电机学模拟试卷 (C)	287
全国高等教育自学考试电机学模拟试卷 (A) 参考答案	291
全国高等教育自学考试电机学模拟试卷 (B) 参考答案	295
全国高等教育自学考试电机学模拟试卷 (C) 参考答案	299

第一篇 变 压 器

变压器是一种以电磁感应原理为基础,将一种电压等级的交流电转变为同频率的另一种电压等级交流电的静止电机。

电力变压器在电力系统中主要用于升、降电压,升压的目的是使电能经济、远距离传输。由 $S = \sqrt{3} UI$ 可知,当输送功率一定 ($S = C$) 时, $I \propto \frac{1}{U}$,即输电电压越高,则输送电流越小,因此线路的电压损耗 ($\Delta u = Iz$) 和功率损耗 ($\Delta p = I^2 r$) 就越小。而降压的目的是为了减小用电设备的制造成本,更是为了安全用电的需要。

本篇以一般用途的双绕组电力变压器为主要研究对象,重点分析变压器对称稳态运行的电磁关系、运行特性及计算方法。

本篇重点是第二章单相变压器运行原理及运行特性,它同样适用于三相变压器的对称稳态运行。

第一章 变压器基本工作 原理和结构

本章是学习变压器的入门基础。

基本要求如下:

- (1) 理解变压器变压不变频的基本工作原理。
- (2) 了解电力变压器主要结构部件及其作用。
- (3) 理解电力变压器的型号及额定值。

第一节 变压器基本工作原理及分类

由电磁感应原理

$$e = - N \frac{d\phi_0}{dt} \quad (1-1)$$

可知,由于一、二次绕组交链于同一磁通(见图 1-1),在 $d\phi_0/dt$ 相同时,感应电动势 e 正比于绕组匝数 N 。因此匝数多,电动势大,电压就高;匝数少,电动势小,电压就低。显然降压变压器 $N_1 > N_2$,升压变压器 $N_1 < N_2$ 。从另一角度说,只要改变绕组匝数,就能达到改变电动势(电压)的目的,这也是变压器的调压原理。

从式(1-1)可知,变压器变压的条件有:①有同时交链于两绕组的交变磁通

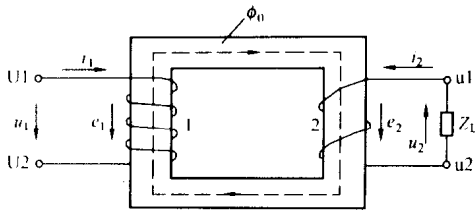


图 1-1 变压器原理示意图

($d\phi_0/dt \neq 0$)；②两绕组的匝数不等 ($N_1 \neq N_2$)。

主磁通对时间的变化率取决于电源频率，由于两绕组交链于同一磁通，因此两绕组感应电动势频率相等（不变频）。

从物理意义上理解：不论一次绕组还是二次绕组，其每匝线圈所交链的磁通相同，因此每匝线圈感应电动势相等。匝数多，电动势（电压）就高，匝数少，电动势（电压）就低。因此两绕组匝数不等，就达到了变压的目的。

第二节 变压器结构简介

油浸电力变压器主要结构部件名称和作用如下：

(1) 铁心。构成主磁路，同时起变压器器身的骨架作用。

(2) 绕组。构成电路，传递能量。

(3) 分接开关。改变变压器绕组匝数来调压。

(4) 油箱、油和冷却装置。

1) 油箱。盛油、保护变压器器身，对小容量变压器还起散热作用。

2) 油。冷却和加强绝缘强度。

3) 冷却装置。用来冷却变压器器身。

(5) 绝缘套管。用来引线，将油箱内绕组通过绝缘套管与外电路相连。

(6) 保护装置有油保护装置和安全保护装置。

1) 油保护装置有：①储油柜。减少油与空气接触面积，以延缓油的氧化过程。②吸湿器。用以清除吸入油箱中空气的潮气和杂质。③净油器。滤除油中杂质和水分，提高油的绝缘性能。

2) 安全保护装置有：①气体继电器。变压器内部的故障保护。②安全气道（或压力释放阀）。防止变压器内部故障产生的高压油蒸汽而炸裂油箱。

(7) 油温测量装置。监控各部位油温。

第三节 变压器的型号和额定值

一、型号

□□□□□—×××/×××

□□□□□用汉语拼音字母表示，为型号的代表符号，其含义见教材表 1-1；横线后的数字为额定容量（kVA），斜线后的数字为高压侧额定电压（kV），它并非是一次侧额定电压。

二、额定值

1. 额定容量 S_N (kVA)

用视在功率表示, 由于电力变压器损耗小, 效率高, 故双绕组变压器一、二次绕组额定容量 (S_{1N} 、 S_{2N}) 相等, 并且也定义为该变压器额定容量 (S_N), 即

$$S_N = S_{1N} = S_{2N} \quad (1-2)$$

注意, 一、二次侧的额定容量相等, 而一、二次侧的功率不等, 两者切勿混淆。

2. 额定电压 U_{1N}/U_{2N} (kV)

需注意的是二次侧额定电压 (U_{2N}) 是一次侧加额定电压 (U_{1N}), 二次侧空载时的端电压 (U_{20}), 它并非是二次侧加额定负载时的端电压。

3. 额定电流 I_{1N}/I_{2N} (A)

对三相变压器, 额定电压和额定电流一律指线电压和线电流 (三相异步电动机、三相同步发电机亦是)。

同步练习

一、填空

1. 变压器变压的条件是铁心中有_____磁通, 一、二次绕组_____不等。
2. 油浸电力变压器中变压器油的作用是_____和_____。
3. 变压器主要结构部件是_____和_____。
4. 变压器二次侧的额定电压是指变压器一次侧加_____, 二次侧_____时的端电压。

二、单项选择

双绕组降压变压器高压绕组的额定容量、额定电压、额定电流分别为 S_{1N} 、 U_{1N} 、 I_{1N} , 低压绕组分别为 S_{2N} 、 U_{2N} 、 I_{2N} , 它们之间的关系是_____。

- (A) $S_{1N} = S_{2N}$ $U_{1N} > U_{2N}$ $I_{1N} > I_{2N}$;
(B) $S_{1N} = S_{2N}$ $U_{1N} > U_{2N}$ $I_{1N} < I_{2N}$;
(C) $S_{1N} > S_{2N}$ $U_{1N} > U_{2N}$ $I_{1N} > I_{2N}$;
(D) $S_{1N} > S_{2N}$ $U_{1N} > U_{2N}$ $I_{1N} < I_{2N}$ 。

三、简答

1. 变压器铁心的作用是什么? 为什么要用两面涂有绝缘漆的硅钢片叠成?
2. 解释变压器铭牌型号 SSPSL-240000/220 的含义。

四、计算

一台 SSP-63000/220 三相电力变压器 YN, d (Y_0/Δ) 接线, $U_{1N}/U_{2N} = 220/10.5$ kV, 求

- (1) 变压器一、二次侧的额定电压和额定电流。
- (2) 变压器一、二次绕组的额定电压和额定电流。

习题解答

1. (教材 1-2) 试从物理意义上分析, 若减少变压器一次绕组匝数 (二次绕组匝数不变), 二次电压将如何变化?

答: 电源电压不变, 变压器一次绕组匝数减少, 则每匝线圈的电压就增大。由于二次绕组匝数不变, 故二次侧电压增高。

2. (教材 1-3) 变压器一次绕组若接在直流电源上, 二次会有稳定的直流电压吗? 为什么?

答: 由电磁感应原理 $e = -N \frac{d\phi_0}{dt}$, 由于直流电流只能产生恒定磁通, 其 $\frac{d\phi_0}{dt} = 0$, 故它不能产生感应电动势, 二次绕组就不会有稳定的直流电压。

3. (教材 1-7) 有一台 $S_N = 125000 \text{ kVA}$, $U_{1N}/U_{2N} = 220/10.5 \text{ kV}$, YN, d 接线的三相变压器, 试求:

(1) 变压器的额定电压和额定电流。

(2) 变压器的一、二次绕组的额定电压和额定电流。

解: (1) 变压器额定电压和额定电流是指一、二次侧额定线电压和线电流。

由题意:

额定电压

$$U_{1N}/U_{2N} = 220/10.5 (\text{kV})$$

额定电流

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}} = \frac{125000}{\sqrt{3} \times 220} = 328 \text{ (A)}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N}} = \frac{125000}{\sqrt{3} \times 10.5} = 6873.2 \text{ (A)}$$

(2) 变压器一、二次绕组的额定电压和额定电流, 对三相变压器 (如图 1-2 所示), 求绕组额定电压实际上就是求加在绕组两端的额定相电压, 求流过绕组中的额定电流实际上就是求额定相电流。

绕组额定电压

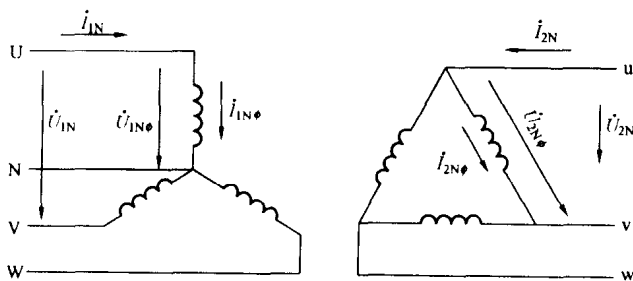


图 1-2 习题解答题 3 图

$$U_{1N\phi} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ (kV)} \quad (\text{YN 接线})$$

$$U_{2N\phi} = U_{2N} = 10.5 \text{ (kV)} \quad (\text{d 接线})$$

绕组额定电流

$$I_{1N\phi} = I_{1N} = 328 \text{ (A)} \quad (\text{YN 接线})$$

$$I_{2N\phi} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{6873.2}{\sqrt{3}} = 3968.2 \text{ (A)} \quad (\text{d 接线})$$

参 考 答 案

一、填空

1. 交变 匝数
2. 冷却 加强绝缘
3. 铁心 绕组
4. 额定电压 空载

二、单项选择

(B)

三、简答

1. 铁心用以构成耦合磁通的磁路以减小励磁电流，同时起变压器器身的骨架作用。用硅钢片叠成铁心，是为了提高磁路导磁性能，减小励磁电流和涡流磁滞损耗。
2. 三相强迫油循环水冷却三绕组铝线电力变压器，额定容量为 240000kVA，高压额定电压为 220kV。

四、计算

解：(1) 额定电压

$$U_{1N} = 220\text{kV}$$

$$U_{2N} = 10.5\text{kV}$$

额定电流

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}} = \frac{63000}{\sqrt{3} \times 220} = 165.3 \text{ (A)}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N}} = \frac{63000}{\sqrt{3} \times 10.5} = 3464 \text{ (A)}$$

(2) 绕组额定电压

$$U_{1N\phi} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ (kV)}$$

$$U_{2N\phi} = U_{2N} = 10.5 \text{ (kV)}$$

绕组额定电流

$$I_{1N\phi} = I_{1N} = 165.3 \text{ (A)}$$

$$I_{2N\phi} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{3464}{\sqrt{3}} = 1999.9 \text{ (A)}$$

第二章 单相变压器运行原理及运行特性

本章是本篇的核心内容，单相变压器运行原理是分析变压器各种运行状况的理论基础。

基本要求如下：

- (1) 掌握变压器的电动势和磁动势平衡及一、二次侧各电磁量之间的关系，重点掌握 $U_1 \rightarrow E_1 \rightarrow \Phi_0 \rightarrow I_0$ 的因果关系。
- (2) 能熟练应用基本方程、等效电路及相量图来分析变压器的各种运行状况。
- (3) 了解折算原则，掌握折算方法。
- (4) 能习惯用标幺值进行电路运算。
- (5) 掌握变压器各参数的物理意义及实测方法。
- (6) 重点掌握变压器运行性能。

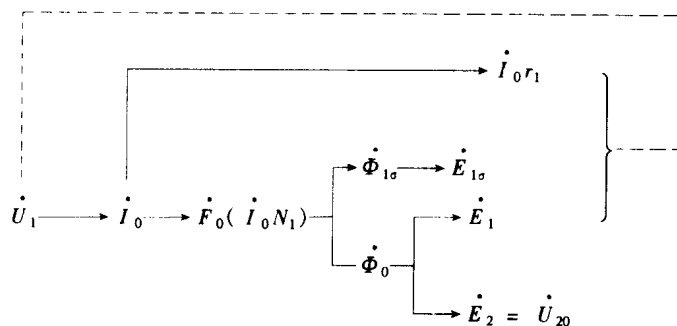
本章除折算及标幺值外全是重点内容，难点是折算概念及励磁阻抗、漏抗的物理意义。

第一节 单相变压器的空载运行

分析变压器的基本方法是将它内部的磁通分成主磁通和漏磁通来研究（异步电机、同步电机和直流电机也是），并引入不同性质的电路参数来反映它们的影响，进而把磁场问题简化为电路问题来研究。

一、变压器空载运行时的电磁状况

图 2-1 为单相变压器空载运行示意图。变压器空载运行时有如下各物理量：



二、变压器空载运行时的各物理量

(一) 空载电流 $\dot{I}_0$

1. 组成和作用

$$\dot{i}_0 \begin{cases} \dot{i}_{0a} \text{ (空载电流有功分量): 供铁心损耗} \\ \dot{i}_{0r} \text{ (空载电流无功分量): 供激励磁通 (也称励磁电流)} \end{cases}$$

$$\dot{i}_0 = \dot{i}_{0a} + \dot{i}_{0r} \quad (2-1)$$

2. 性质和大小

(1) 性质。因 $I_{0r} \gg I_{0a}$ ，故空载电流 I_0 为感性无功性质，也即变压器在空载运行时功率因数极低 ($\cos \varphi_0 \approx 0.2$)，因此变压器运行规程规定，不允许长时间在电网上空载运行，否则会影响电网的功率因数。

当忽略相对较小的 I_{0a} ，则 $I_0 \approx I_{0r}$ ，故有时把空载电流也称作励磁电流。

(2) 大小。 I_0 的大小一般用它对额定电流的百分值 $I_0 (\%)$ 来表示，即

$$I_0 (\%) = \frac{I_0}{I_N} \times 100 \quad (2-2)$$

其值越小越好，一般在 $1 \sim 8$ 范围内。它随容量的增大而减小，大容量电力变压器的 $I_0 (\%) < 1$ 。

3. 波形

由于磁路饱和（非线性）缘故，主磁通 ϕ_0 和产生主磁通的励磁电流 I_0 不可能同为正弦波形。在单相变压器中，若主磁通为正弦波形，当磁路饱和后，由于励磁电流增长幅度远比主磁通增长幅度快得多，故励磁电流就呈尖顶波形；反之，若励磁电流为正弦波形，当磁路饱和后，由于主磁通增长幅度远比励磁电流慢得多，此时主磁通就呈平顶波。即

$$\phi_0 \text{ (正弦波形)} \rightarrow i_0 \text{ (尖顶波形)}$$

$$i_0 \text{ (正弦波形)} \rightarrow \phi_0 \text{ (平顶波形)}$$

对三相变压器却不一定，其励磁电流和主磁通的波形还分别受绕组连接方式和铁心结构的制约。

(二) 主磁通 $\dot{\Phi}_0$ 和一次漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$

同时交链于一、二次绕组，且以铁心作闭合回路的磁通，称作主磁通 Φ_0 。而仅与一次（或二次）绕组交链，主要以变压器油（非铁磁性物质）构成回路的磁通，称作一次（或二次）漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ （或 $\Phi_{2\sigma}$ ）。

空载时， Φ_0 与 $\Phi_{1\sigma}$ 虽由同一磁动势 F_0 产生（负载时却不是），但它们的性质有极大的差异，见表 2-1。

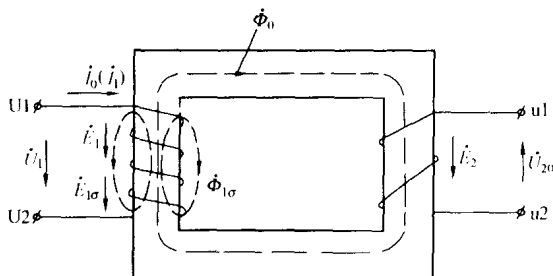


图 2-1 单相变压器空载运行示意图

表 2-1

空载时 Φ_0 与 $\Phi_{1\sigma}$ 的性质

比较项目	磁 通	Φ_0	$\Phi_{1\sigma}$
路 径		铁心 (铁磁性物质)	变压器油 (非铁磁性物质)
数 量		占总磁通 99% 以上	不足总磁通的 1%
性 质		Φ_0 与 I_0 呈非线性关系	$\Phi_{1\sigma}$ 与 I_0 呈线性关系
作 用		传递能量	起漏抗压降作用

(三) 一、二次绕组主电动势 E_1 、 E_2

经推导得

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_1 &= -j4.44fN_1\dot{\Phi}_m \\ \dot{E}_2 &= -j4.44fN_2\dot{\Phi}_m \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

由式 (2-3) 知: ①主电动势 E 的大小与频率 f 、绕组匝数 N 及主磁通幅值 Φ_m 成正比 (此式只表明 E 与 f 、 N 、 Φ_m 间的大小关系, 而不表明它们间的因果关系); ②在时间相位上, 主电动势 $\dot{E}$ 滞后主磁通 $\dot{\Phi}_0$ 90° ; ③主磁通为正弦波形, 主电动势也为正弦波形 (只有正弦波形的磁通才能感应出正弦波形的电动势), 故它们均可用相量形式表示。

(四) 一次漏电动势 $E_{1\sigma}$

一次漏电动势由一次漏磁通感应的, 同样可推得类同于上式的表达形式 ($E_{1\sigma} \propto \Phi_{1\sigma}$), 但考虑到漏磁通是线性磁路, I_0 (负载时为 I_1) $\dot{\Phi}_{1\sigma}$, 因此可得

$$E_{1\sigma} \propto \Phi_{1\sigma} \propto I_0$$

即 $E_{1\sigma} \propto I_0$, 则 $E_{1\sigma}$ 与 I_0 间有一比例常数, 它即为 x_1 , 称之为一次绕组漏抗, 简称一次漏抗, 即

$$x_1 = \frac{E_{1\sigma}}{I_0} \propto \frac{\Phi_{1\sigma}}{I_0}$$

从物理意义上说, 一次漏抗是反映一次漏电动势或漏磁通大小的物理量 (当 I_0 一定)。

一次漏电动势 $E_{1\sigma}$ 的大小可写成

$$E_{1\sigma} = I_0 x_1 \quad (\text{负载时为 } E_{1\sigma} = I_1 x_1)$$

相量形式

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j\dot{I}_0 x_1 \quad (\text{负载时为 } \dot{E}_{1\sigma} = -j\dot{I}_1 x_1) \quad (2-4)$$

可见漏电动势可用漏抗压降来表示, 它在相位上滞后于产生漏磁通的电流 $\dot{I}_0$ (负载时为 $\dot{I}_1$) 90° 。这样漏磁通对电路的影响就可用电路的参数 (漏抗) 来表示, 也就是说, 引入了电抗这一参数, 就可把电磁耦合问题转化为电路问题来研究了。

需强调的是, 漏抗 x_1 是常数 (因漏磁通不饱和, 是线性磁路), 它不随电源电压和负载情况而变。

既然漏电动势可用漏抗压降来表示, 那么一次主电动势能否也可引入一个电路的参数

来表示呢，回答是肯定的，但有条件。

励磁电流 I_0 产生主磁通 Φ_0 ， Φ_0 感应主电动势 E_1 ，即 $I_0 \rightarrow \Phi_0 \rightarrow E_1$ 。由于主磁通是非线性磁路（磁路饱和），故 Φ_0 与 I_0 不成比例，故需作线性化处理，只有在特定条件下（当电源电压波动很少，即在磁化曲线很小一区段内） $\Phi_0 \propto I_0$ ，而 $E_1 \propto \Phi_0$ ，故

$$E_1 \propto \Phi_0 \propto I_0$$

即 $E_1 \propto I_0$ ， E_1 与 I_0 间就有一比例常数，即

$$z_m = \frac{E_1}{I_0} \propto \frac{\Phi_0}{I_0}$$

z_m 称作励磁阻抗，它是反映主电动势或主磁通大小的物理量（ I_0 一定），与漏磁通不同的是主磁通除在绕组中感应主电动势外，还要在铁心中产生铁心损耗，故就不能单纯地引入一个电抗 x_m 参数，还需引入能反映铁心损耗的一个电阻 r_m 参数，用 $I_0^2 r_m = p_{Fe}$ 来反映变压器的铁心损耗。注意 r_m 并非是铁心电阻，更不是 I_0 流经铁心是铁心电阻 r_m 所产生的损耗，它仅仅是一个反映铁心损耗的虚拟的等效电阻。因此，励磁阻抗 Z_m 由励磁电阻 r_m 和励磁电抗 x_m 两部分组成。

$$z_m = r_m + jx_m \quad (2-5)$$

这样主电动势

$$E_1 = I_0 z_m$$

因电压指电位降，而电动势为电位升，故它们相位相反，用相量表示时为

$$\dot{E}_1 = - \dot{I}_0 z_m = - \dot{I}_0 (r_m + jx_m) \quad (2-6)$$

需强调指出的是：励磁阻抗 z_m 只有在特定条件下（经线性化处理）才是常数。但由于 Φ_0 磁路饱和，饱和后， I_0 的增长幅度较 Φ_0 快，故励磁阻抗（ $z_m \propto \Phi_0 / I_0$ ）将随磁路的饱和而减小（它不为常数）。

综上所述可知，引入电抗的目的，就是要把电磁耦合问题转化为电路问题来研究，也就是要把磁通对电路的影响转化为电路的参数来表示。因此电抗总是对应于磁通（有什么样的磁通——交变磁通，只要该磁通能在绕组中感应电动势，就一定可引入一个电抗参数来描述该磁通对电路的作用）。如变压器或交流电机往往有多种电抗，这时需从磁路中找出各种交变磁通，只要判断出该磁通能在绕组中感应电动势，那么就一定有该磁通所对应的电抗。因此在学习电机学时，了解各种磁通的物理情况是十分必要的。电抗是电机的一个重要参数，望读者予以重视。

经推导可得电抗 x

$$x = 2\pi f \frac{N^2}{R_m}$$

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (2-7)$$

R_m 为该电抗所对应磁通的磁阻，由此可知，电抗与电源频率、绕组匝数平方成正比，与它所对应磁通的磁阻成反比，因漏磁通为线性磁路（ $\mu = C$ ），磁阻为常数，故漏抗 x_l 为