

高职高专电气系列教材

电机学

DIAN JI XUE

主 编 张小兰
副主编 李霜 蒋燕

重庆大学出版社

1. 数字电子技术
2. 模拟电子技术
3. 电子技术实训教程
4. 电路原理
5. 电工电子学实训教程
6. 单片机原理及运用
7. 单片机应用技术实训教程
8. 电气控制技术
9. 电气控制技术实训教程
10. 发电厂变电站电气设备
11. 厂站实训教程
12. 电力系统继电保护
13. 电力系统
14. 工厂供电
15. 电机学
16. 电机及拖动基础
17. 电机及拖动实训
18. 可编程序控制器
19. 可编程序控制器实训教程
20. 电力电子技术
21. 电力电子技术实训教程
22. 工控组态软件
23. 电力生产概论

ISBN 7-5624-3511-1



9 787562 435112 >

ISBN 7-5624-3511-1

定价：15.00元

电 机 学

主 编 张小兰

副主编 李 霜 蒋 燕

重 庆 大 学 出 版 社

内 容 提 要

本书为高职高专电气专业系列教材之一。全书内容包括:变压器同步发电机、三相异步电动机的基本结构、运行原理,交流绕组,同步发电机的运行监视及异常运行分析和处理,直流电机等。

图书在版编目(CIP)数据

电机学/张小兰主编. —重庆:重庆大学出版社,
2005.11

(高职高专电气系列教材)

ISBN 7-5624-3511-1

I. 电... II. 张... III. 电机学—高等学校:技术
学校—教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 101022 号

电 机 学

主 编 张小兰

副主编 李 霜 蒋 燕

责任编辑:曾令维 邵孟春 版式设计:曾令维

责任校对:任卓惠 责任印制:秦 梅

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街 174 号重庆大学(A 区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

重庆铜梁正兴印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:9.25 字数:231千

2005年12月第1版 2005年12月第1次印刷

印数:1—3 000

ISBN 7-5624-3511-1 定价:15.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换
版权所有,请勿擅自翻印和用本书
制作各类出版物及配套用书,违者必究。

前言

《电机学》是为高职高专电气类专业编写的一本教材。是根据高职高专人才培养所需知识、能力和素质结构的要求,以培养高级应用型人才为目标,本着理论上以“够用为度、注重应用”的原则而编写。内容上不追求电机电磁理论的系统性和完整性,而突出“新技术、大容量”的特点,紧密结合生产一线的需要。加强了大型电力变压器和大型同步发电机的结构、异常运行及处理等内容。改变了传统《电机学》中大量的定量分析为定性分析,更加注重基本概念和结论的应用。

本教材是我校(重庆电力高等专科学校)《电机学》精品课程配套教材,并有配套的多媒体课件,网址: <http://www.cqepc.com.cn> (重庆电力高等专科学校网站)和《电机实验》教材。

本教材在编写过程中得到了我校“电机学精品课程组”所有成员的大力支持和帮助,尤其是黄永铭教授提供了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢!

本教材由重庆电力高等专科学校张小兰担任主编,李霜、蒋燕担任副主编,张小兰编写1~5章、11~13章,李霜编写7~10章,蒋燕编写6、14章。由重庆电力高等专科学校郭强副教授主审。

由于水平有限,书中不足和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2005年9月

目 录

第 1 章 变压器的基本知识及结构	1
1.1 变压器的基本工作原理	1
1.2 大型电力变压器的结构	2
1.3 变压器的型号和额定值	6
习题 1	6
第 2 章 变压器的运行原理	8
2.1 变压器的空载运行	8
2.2 变压器的负载运行	11
2.3 变压器的参数测定	14
2.4 变压器的运行特性	17
习题 2	19
第 3 章 三相变压器	20
3.1 三相变压器的连接组别	20
3.2 磁路和电路连接形式对空载电势波形的影响	24
习题 3	25
第 4 章 其他变压器	27
4.1 三绕组变压器	27
4.2 自耦变压器	29
习题 4	31
第 5 章 变压器的运行	32
5.1 变压器并联运行	32
5.2 三相变压器的不对称运行	35
5.3 变压器常见故障类型及处理	37
习题 5	39
第 6 章 交流绕组	40
6.1 交流绕组的基本知识	40
6.2 交流绕组的电动势	45

6.3 交流绕组的磁动势	47
习题6	50
第7章 同步发电机的基本知识及结构	51
7.1 同步发电机的基本工作原理	51
7.2 大型同步发电机的结构	52
7.3 大型同步发电机的基本系统	57
习题7	60
第8章 同步发电机的运行原理	61
8.1 同步发电机的主磁通	61
8.2 同步发电机的电动势方程式和相量图	64
8.3 同步发电机的运行特性	68
习题8	71
第9章 同步发电机的并列运行	72
9.1 并列运行的条件和方法	72
9.2 同步发电机的稳态功角特性	74
9.3 并列运行时有功功率的调节和静态稳定	76
9.4 并列运行时无功功率的调节和V形曲线	79
习题9	81
第10章 同步发电机运行监视及异常运行分析和处理 ..	83
10.1 同步发电机的主要技术参数	83
10.2 运行中的监视及检查	84
10.3 同步发电机在非额定工况时的运行	85
10.4 同步发电机不对称运行	86
10.5 同步发电机突然短路	88
10.6 同步发电机失磁运行	90
10.7 同步发电机进相运行	93
10.8 同步发电机的常见故障类型	94
习题10	96
第11章 三相异步电动机的基本知识及结构	97
11.1 三相异步电动机的基本工作原理	97
11.2 三相异步电动机的结构	98
11.3 三相异步电动机的铭牌数据	100
习题11	102
第12章 三相异步电动机的运行原理	103
12.1 三相异步电动机运行时的电磁关系	103
12.2 三相异步电动机的功率与转矩	106
12.3 三相异步电动机的机械特性	108

12.4 三相异步电动机的工作特性	110
习题 12	111
第 13 章 三相异步电动机的运行	112
13.1 三相异步电动机的起动	112
13.2 三相异步电动机的调速	116
13.3 三相异步电动机的异常运行及常见故障类型 ...	118
13.4 单相异步电动机	122
习题 13	124
第 14 章 直流电机	126
14.1 直流电机的基本工作原理	126
14.2 直流电机的基本结构	128
14.3 直流发电机的运行	131
14.4 直流电动机的运行	134
习题 14	137

第 1 章

变压器的基本知识及结构

1.1 变压器的基本工作原理

1.1.1 变压器的基本工作原理

变压器是利用电磁感应定律把一种电压等级的交流电能转换成同频率的另一种电压等级的交流电能。其基本结构如图 1.1 所示,在铁心柱上绕制两个绝缘线圈。电源侧的线圈称为原边绕组或一次绕组,负载侧的线圈称为副边绕组或二次绕组。

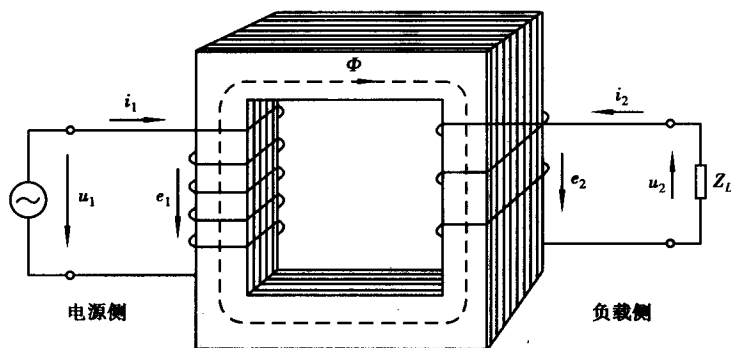


图 1.1 变压器的基本工作原理

当原边绕组接到交流电源时,绕组中便有交流电流流过,并在铁心中产生与外加电压频率相同的磁通。这个交变磁通同时交链着原边绕组和副边绕组。原、副绕组的感应电势分别为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

因 $e_1 \approx u_1; e_2 \approx u_2$

所以

$$\frac{u_1}{u_2} \approx \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

其中 k 为变压器的变比,它等于原、副绕组的匝数比,也等于原边一相绕组的感应电势与副边一相绕组的感应电势之比。

由此可见,只要改变变压器的变比 k ,就能达到改变电压的目的。

1.1.2 变压器的分类

变压器的种类很多,可按其用途、相数、结构、调压方式、冷却方式等不同来进行分类。

按用途分类:升压变压器、降压变压器;

按相数分类:单相变压器和三相变压器;

按绕组数分类:双绕组变压器、三绕组变压器和自耦变压器;

按铁心结构分类:心式变压器和壳式变压器;

按调压方式分类:无励磁调压变压器、有载调压变压器;

按冷却介质和冷却方式分类:油浸式变压器和干式变压器等;

按容量大小分类:小型变压器、中型变压器、大型变压器和特大型变压器。

1.2 大型电力变压器的结构

油浸式变压器在电力系统使用最为广泛,其基本结构可分成以下几个部分:铁心、绕组、绝缘套管、油箱及其他附件等。三相油浸式电力变压器的外形如图 1.2 所示,其中铁心和绕组是变压器的主要部件,称为器身,如图 1.3 所示,器身放在油箱内部。

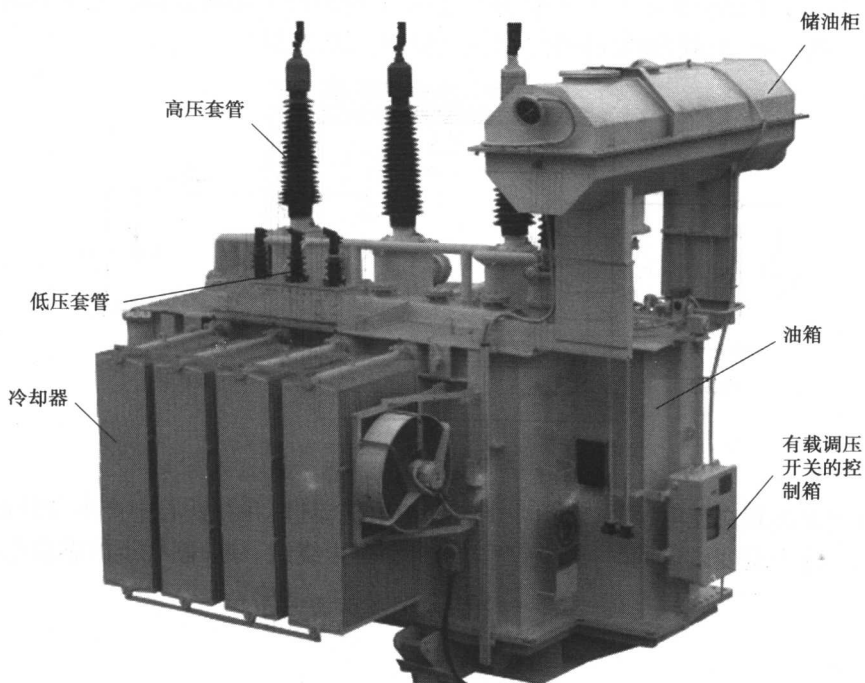


图 1.2 三相油浸式电力变压器外形图 1



图 1.3 三相油浸式电力变压器的器身

1.2.1 铁心

(1) 铁心的材料

为了提高磁路的导磁性能,减小铁心中的磁滞、涡流损耗,铁心一般采用高磁导率的铁磁材料,即用 $0.35 \sim 0.5 \text{ mm}$ 厚的硅钢片叠成。变压器用的硅钢片含硅量比较高。硅钢片的两面均涂有绝缘漆,这样可使叠装在一起的硅钢片相互之间绝缘。

(2) 铁心形式

铁心是变压器的主磁路,电力变压器的铁心主要采用心式结构,如图 1.4 所示。三相变压器是将 A、B、C 三相的绕组分别放在 3 个铁心柱上,3 个铁心柱由上、下两个铁轭连接起来,构成闭合磁路。绕组的布置方式是将低压绕组放在内侧,而把高压绕组放在外侧。

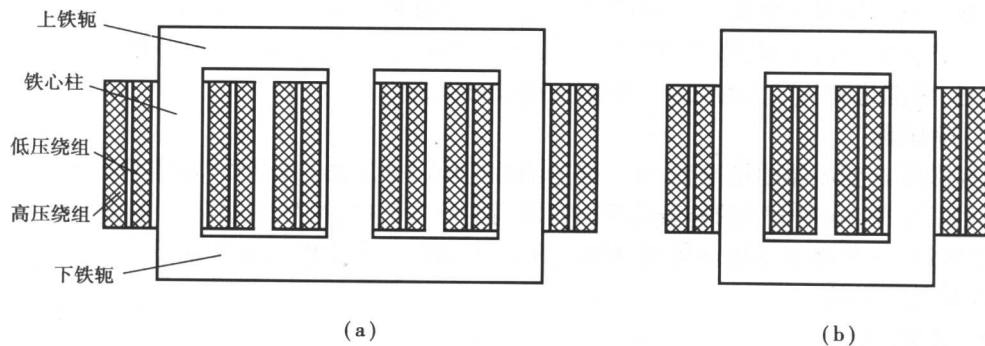


图 1.4 心式变压器的铁心和绕组布置
(a)三相;(b)单相

1.2.2 绕组

绕组是变压器的电路部分,它是铜或铝导线包绕绝缘纸以后绕制而成。按照线圈绕制的特点,分为圆筒式、螺旋式、连续式、纠结式等结构。为了便于绝缘,低压绕组靠近铁心柱,高压绕组套在低压绕组外面,两个绕组之间留有油道。变压器绕组外形如图 1.5 所示。

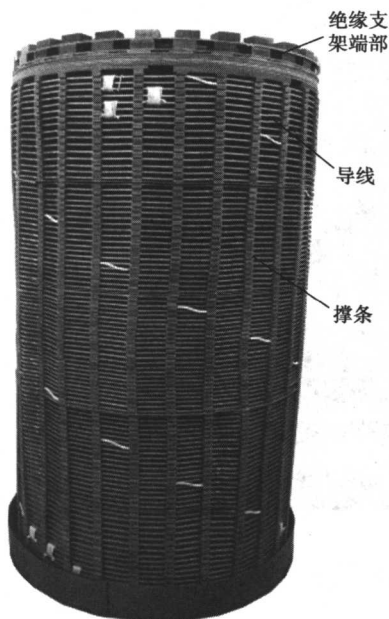


图 1.5 绕组

1.2.3 油箱及其他附件

(1) 油箱

油浸式变压器均要有一个油箱,装入变压器油后,将组装好的器身装入其中,以保证变压器正常工作。变压器油用做加强变压器内部绝缘强度和散热作用。对变压器油箱要求比较高,要用质量好的钢板焊接而成,能承受一定压力,某些部位必须具有防磁化性能。为了检修变压器的方便,大型变压器油箱均采用了钟罩式结构,钟罩式就是将油箱盖和油箱壁制成一体,罩在器身上,变压器检修时不用吊起沉重的器身,只要将油放掉,将上节油箱吊起就可以检修。

(2) 储油柜

变压器在运行中,随着油温的变化,油的体积会膨胀或收缩,为了减少油与外界空气的接触面积,减小变压器油受潮和氧化的概率,通常在变压器上部安装一个储油柜(俗称油枕)。在大型电力变压器的储油柜内还安放一个特殊的空气胶囊(一般用耐油氯丁橡胶制成),它通过呼吸器与外界相通,空气胶囊阻止了储油柜中变压器油与外界空气接触。空气胶囊形状可以随油的膨胀或收缩而变化,储油柜通过油管、瓦斯继电器与主油箱连通,这样保持了主油箱始终充满了油,并且不与外界空气接触。

(3) 呼吸器

变压器随着负荷和气温变化,变压器油温也不断变化,这样油枕内的油位随着整个变压器油的膨胀或收缩而发生变化,为了使潮气不能进入油枕使油劣化,将油枕用一个管子从上部连通到一个内装硅胶的干燥器(俗称呼吸器),硅胶对空气中水分具有很强的吸附作用,干燥状态为蓝色,吸潮饱和后变为粉红色。吸潮的硅胶可以再生。

(4) 冷却器

直接装配在变压器油箱壁上,对于强迫油循环风冷变压器,电动泵从油箱顶部抽出热油送入散热器管簇中,这些管簇的外表受到来自风扇的冷空气吹拂,使热量散失到空气中去,经过冷却后的油从变压器油箱底部重新回到变压器油箱内。无论电动泵装在冷却器上部还是下部,其作用是一样的。

(5) 绝缘套管

变压器绕组的引出线从油箱内部引到箱外时必须经过绝缘套管,使引线与油箱绝缘。绝缘套管一般是陶瓷的,其结构取决于电压等级。1 kV 以下的采用实心磁套管,10 ~ 35 kV 的采

用空心充气或充油式套管,110 kV 及以上的采用电容式套管。为了增大外表面放电距离,套管外形做成多级伞形裙边。电压等级越高,级数越多。

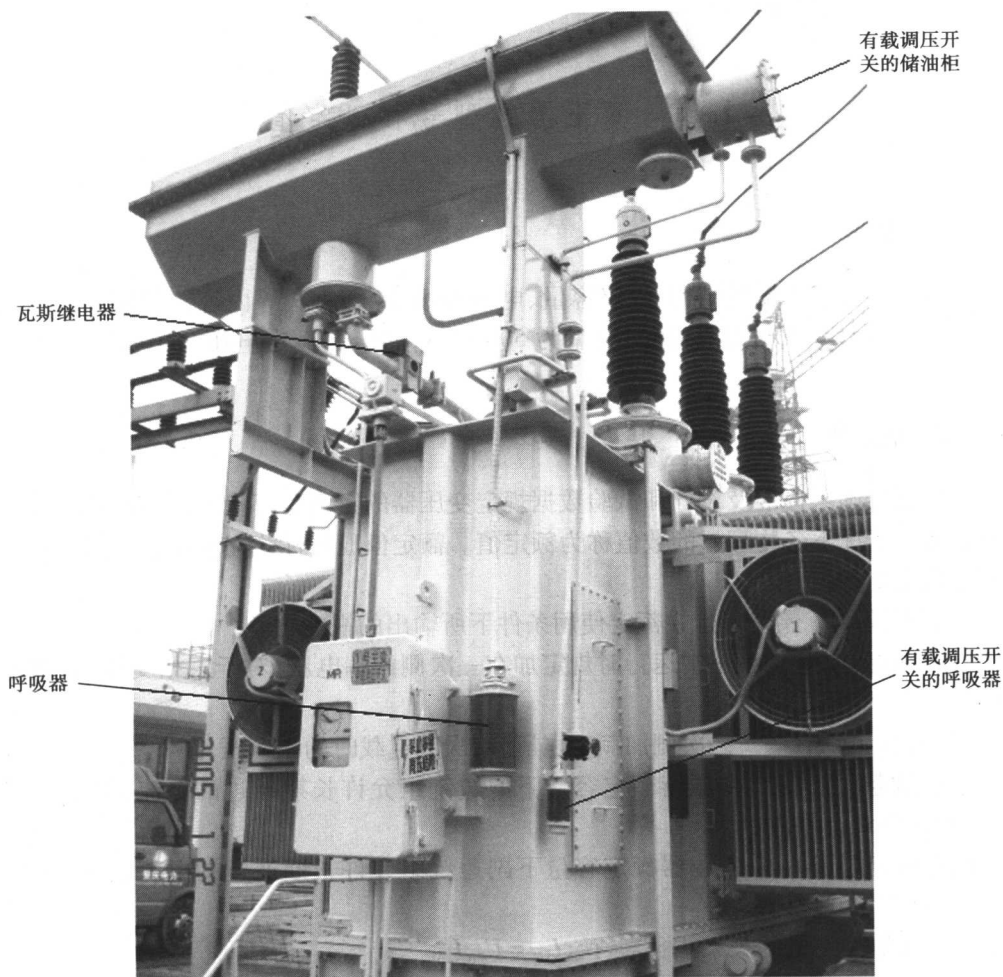


图 1.6 三相油浸式电力变压器外形图 2

(6) 分接开关

变压器常用改变绕组匝数的方法来调压。一般从变压器的高压绕组引出若干抽头,称为分接头,用以切换分接头的装置称为分接开关。分接开关分为无载调压和有载调压两种,前者必须在变压器停电的情况下切换,后者可以在变压器带负载情况下进行切换。分接开关安装在油箱内,其控制箱在油箱外,有载调压分接开关内的变压器油是完全独立的,它也有配套的油箱、瓦斯继电器、呼吸器。

(7) 压力释放阀

当变压器内部发生严重故障而产生大量气体时,油箱内压力迅速增加,为防止变压器发生爆炸,油箱上安装压力释放阀。

(8) 气体继电器

气体继电器又称为瓦斯继电器,是变压器的一种保护装置,安装在油箱与储油柜的连接管

道中,当变压器内部发生故障时(如绝缘击穿、匝间短路、铁心事故、油箱漏油使油面下降较多等)产生的气体和油流,迫使气体继电器动作。轻者发出信号,以便运行人员及时处理。重者使断路器跳闸,以保护变压器。

1.3 变压器的型号和额定值

1.3.1 型号

型号表示一台变压器的结构、额定容量、电压等级、冷却方式等内容。例如:SL—500/10;表示三相油浸自冷双线圈铝线,额定容量为 500 kVA,高压侧额定电压为 10 kV 级的电力变压器。

1.3.2 额定值

制造厂根据国家标准及设计和试验数据规定变压器的正常运行状态,称为额定运行情况。表示额定运行情况下各物理量的数值称为额定值。额定值通常标注在变压器的铭牌上。变压器的额定值主要有:

①额定容量 S_N 铭牌规定在额定使用条件下所输出的视在功率。

②原边额定电压 U_{1N} 正常运行时规定加在一次侧的端电压,对于三相变压器,额定电压为线电压。

③副边额定电压 U_{2N} 一次侧加额定电压,二次侧空载时的端电压。

④原边额定电流 I_{1N} 变压器额定容量下原边绕组允许长期通过的电流,对于三相变压器, I_{1N} 为原边额定线电流。

⑤副边额定电流 I_{2N} 变压器额定容量下副边绕组允许长期通过的电流,对于三相变压器, I_{2N} 为副边额定线电流。

单相变压器额定值的关系式: $S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N}$ 。

三相变压器额定值的关系式: $S_N = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N}$ 。

额定频率 f_N :我国工频为 50 Hz。

另外还有额定效率、温升等额定值。

习 题 1

1.1 简述变压器的基本工作原理。

1.2 试从物理意义上分析,若减少变压器原边绕组匝数(副边绕组匝数不变),副边电压将如何变化?

1.3 变压器原边绕组若接在直流电源上,副边会有稳定的直流电压吗?为什么?

1.4 油浸式电力变压器中变压器油的作用是什么?

1.5 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?

1.6 一台单相变压器, $S_N = 5\,000\text{ kVA}$, $U_{1N}/U_{2N} = 10/6.3\text{ kV}$, 求: 变压器原、副边的额定电流。

1.7 一台三相电力变压器, $S_N = 125\,000\text{ kVA}$, Y, d 接线, $U_{1N}/U_{2N} = 220/10.5\text{ kV}$, 求: 变压器原、副边的额定电流。

第 2 章

变压器的运行原理

2.1 变压器的空载运行

变压器空载运行是指变压器原边绕组接额定电压、额定频率的交流电源,副边绕组开路时的运行状态。变压器空载运行时的示意图如图 2.1 所示。原、副边电路的各物理量分别用下标“1”和“2”标注,以示区别。

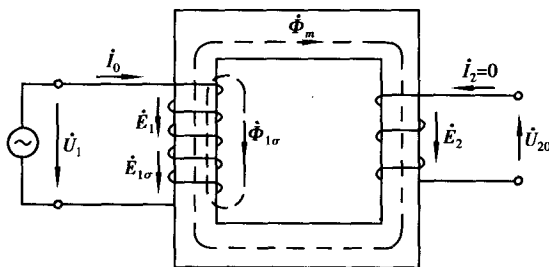
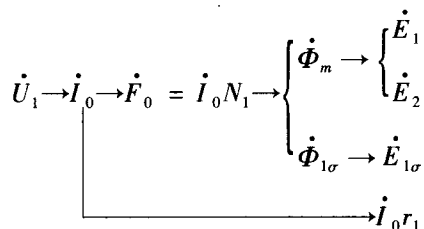


图 2.1 变压器空载运行时的示意图

2.1.1 空载时各物理量产生的因果关系

当原绕组接上电源后,绕组中便有很小的电流流过,称为空载电流 $\dot{i}_0$, $\dot{i}_0$ 在原绕组中产生交变磁动势 $\dot{F}_0 = \dot{i}_0 N_1$, 并建立起交变磁通。该磁通可分为两部分:一部分沿铁心闭合,同时交链原、副绕组,称为主磁通 $\dot{\Phi}_m$, 是传递能量的媒介;另一部分只交链原绕组,经原绕组附近的空间闭合,称为原绕组的漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 。由于铁心的磁导率远比铁心外非铁磁材料的磁导率大,故总磁通中的绝大部分是主磁通,而漏磁通只占总磁通的一小部分。主磁通和漏磁通都是与电流频率相同的交变磁通。根据电磁感应定律, $\dot{\Phi}_m$ 将在原、副绕组中感应电动势 $\dot{E}_1, \dot{E}_2$,

$\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 将在原绕组中感应电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 。此外,空载电流 $\dot{I}_0$ 还在原绕组中产生很小的电阻压降 $\dot{I}_0 r_1$,变压器空载时各物理量产生的因果关系为



2.1.2 电势与磁通的大小和相位关系

设主磁通按正弦规律变化,即

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (2.1)$$

根据电磁感应定律,原绕组的感应电势的瞬时值为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f N_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

则原绕组感应电势的有效值为

$$E_1 = \frac{2\pi f N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (2.2)$$

相量关系为

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m \quad (2.3)$$

同理可得

$$\dot{E}_2 = -j4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m \quad (2.4)$$

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_{1\sigma m} \quad (2.5)$$

所以,变压器原、副绕组的感应电势大小与磁通成正比,与各自的匝数成正比,感应电势在相位上滞后磁通 90° 。

2.1.3 原边漏电抗和激磁电抗

(1) 原边漏电抗 $x_{1\sigma}$

由于空载电流 $\dot{I}_0$ 与原边漏电势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 有如下因果关系:

$$\dot{I}_0 \rightarrow \dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1 \xrightarrow{\text{漏磁路}} \dot{\Phi}_{1\sigma} = \frac{\dot{F}_0}{R_{\text{漏磁路}}} \rightarrow \dot{E}_{1\sigma} = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_{1\sigma m}$$

漏磁路不饱和,所以 $\dot{E}_{1\sigma}$ 与 $\dot{I}_0$ 成正比关系,且 $\dot{E}_{1\sigma}$ 滞后 $\dot{I}_0$ 90° 。为了计算 $\dot{E}_{1\sigma}$,可引入原边漏电抗 $x_{1\sigma}$,其值为

$$x_{1\sigma} = \frac{E_{1\sigma}}{I_0}$$

则相量关系为