

模块 3

变 压 器

知识点

- (1) 变压器的基本结构和原理；
- (2) 变压器的运行特性及参数的测定；
- (3) 三相变压器；
- (4) 其他常用变压器。

学习要求

- (1) 掌握变压器的基本结构；
- (2) 具备变压器的原理分析和参数测定能力；
- (3) 具备变压器的运行特性和基本计算能力；
- (4) 具备变压器联结组别的判断能力；
- (5) 具备互感器等特殊变压器的正确使用能力。

变压器是一种静止的电器，它是利用电磁感应原理，将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。

变压器是电力系统中一种重要的电气设备，它对电能的经济传输、灵活分配和安全使用具有重要的意义。

此外，各种用途的控制变压器、仪用互感器等也应用得十分广泛。

本模块主要介绍变压器的用途、分类、结构及额定值，着重阐明变压器的工作原理和运行特性、三相变压器的特点与并联运行，最后简要地介绍自耦变压器和互感器的结构特点及工作原理。

3.1 课题 变压器的基本工作原理和结构

3.1.1 变压器的用途和分类

1. 变压器的用途

电力系统中使用的变压器称为电力变压器，它是电力系统中的重要设备。目前世界各国使用的电能基本上均是由各类（火力、水力、核能等）发电站发出的三相交流电能，发

电站一般建在能源产地,江、海边或远离城市的地区。

发电机的输出电压因受绝缘及工艺技术的限制不可能太高,一般为 $6.3\sim 27\text{kV}$ 。要想把发出的大功率电能直接送到很远的用电区域,需用升压变压器把发电机的端电压升到较高的输电电压。这是因为输出功率一定时,输电线路的电压越高,输电线路中的电流越小,不仅可以减小输电线的截面积,节约导电材料的用量,而且还可以减小线路的功率损耗。一般来说,当输电距离越远、输送的功率越大时,要求的输电电压也越高。我国现有高压线路的输电电压为 110kV 、 220kV 、 330kV 、 500kV 及 750kV 等几种。

当电能输送到用电地区后,为了安全用电,又必须用降压变压器逐步将输电线路上的高电压降到配电系统的配电电压,然后再送到各用电分区,最后再经配电变压器把电压降到用户所需要的电压等级,供用户使用。故从发电、输电、配电到用户,通常需经过多次升压和降压。

另外,变压器的用途还很多,如测量系统中广泛应用的仪用互感器,可将高电压变换成低电压或将大电流变换成小电流,以隔离高压和便于测量;在实验室中广泛应用的自耦调压器,可任意调节输出电压的大小,以适应负载的要求;在电信、自动控制系统中,控制变压器、电源变压器和用于阻抗变换的输入、输出变压器等也被广泛应用。

2. 变压器的分类

变压器的品种、规格很多,分类方法也很多。通常根据变压器的用途、相数、绕组数目、铁芯结构和冷却方式等分类。

(1) 按用途分,可以分为以下几类。

① 电力变压器——主要应用于电能的输送与分配。电力变压器又可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器、联络变压器和厂用变压器等几种。

② 特殊电源用变压器——如电炉、电焊、整流变压器等。

③ 仪用变压器——供测量和继电保护用的变压器,如电压、电流互感器等。

④ 实验变压器——专供电气设备作耐压用的高压变压器。

⑤ 调压器——能均匀调节输出电压的变压器,如自耦调压器、感应调压器等。

⑥ 控制变压器——容量一般比较小,用于小功率电源系统和自动控制系统,如电源变压器、输入变压器、输出变压器、脉冲变压器等。

(2) 按相数分,有单相变压器、三相变压器和多相变压器。

(3) 按绕组数目分,有单绕组(自耦)变压器、双绕组变压器、三绕组变压器和多绕组变压器。

(4) 按铁芯结构分,有壳式变压器和心式变压器。

(5) 按冷却方式分,有干式变压器、油浸式变压器和充气式变压器等。

(6) 按容量分,有小型变压器(容量为 $10\sim 630\text{kV}\cdot\text{A}$)、中型变压器(容量为 $800\sim 6300\text{kV}\cdot\text{A}$)、大型变压器(容量为 $8000\sim 63000\text{kV}\cdot\text{A}$)和特大型变压器(容量在 $90000\text{kV}\cdot\text{A}$ 以上)。

3.1.2 变压器的基本工作原理

由于变压器是利用电磁感应原理工作的,因此它主要由铁芯和套在铁芯上的两个独

立绕组组成,图 3-1 为单相变压器的工作原理图。这两个绕组间只有磁的耦合而没有电的联系,且具有不同的匝数,其中与交流电源相接的绕组称为一次绕组或原绕组,又称为原边或初级,其匝数为 N_1 ;与用电设备(负载)相接的绕组称为二次绕组或副绕组,又称为副边或次级,其匝数为 N_2 。

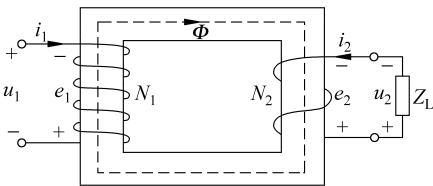


图 3-1 单相变压器的工作原理图

当一次绕组外加电压为 u_1 的交流电源,二次绕组接负载时,一次绕组将流过交变电流 i_1 ,并在铁芯中产生交变磁通 Φ ,该磁通同时交链一、二次绕组,并在两绕组中分别产生感应电动势 e_1 、 e_2 ,它们的大小为

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= -e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ u_2 &= e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3-1)$$

式中, N_1 、 N_2 分别为变压器一、二次绕组的匝数。

若把负载接于二次绕组,在电动势 e_2 的作用下,就能向负载输出电能,即电流将流过负载,实现电能的传递。

若不计变压器一、二次绕组的电阻和漏磁通,不计铁芯损耗,即认为是理想变压器, $u_1 \approx e_1$, $u_2 \approx e_2$,则一、二次绕组的电压和电动势有效值与匝数的关系为

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (3-2)$$

式中, k 为匝数比,亦即电压比, $k = N_1/N_2$, $k > 1$ 为降压变压器, $k < 1$ 为升压变压器。

根据能量守恒定律可得

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

即

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k} \quad (3-3)$$

由式(3-3)可知,一、二次绕组的电压与绕组的匝数成正比,一、二次绕组的电流与绕组的匝数成反比,因此只要改变绕组的匝数比,就能达到改变输出电压和输出电流大小的目的,这就是变压器的基本工作原理。

3.1.3 变压器的基本结构

电力变压器主要由铁芯、绕组、绝缘套管、油箱(油浸式)及其他附件组成,油浸式电力变压器的结构如图 3-2 所示。铁芯和绕组是变压器的主要组成部分,称为变压器的器身。下面着重介绍变压器的基本结构。

1. 铁芯

铁芯是变压器的主磁路部分,又作为绕组的支撑骨架。铁芯由铁芯柱和铁轭两部分组成。铁芯柱上套装有绕组,铁轭的作用则是使整个磁路闭合。为了提高磁路的导磁性能和减少铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗,铁芯一般由厚度为 $0.35 \sim 0.5\text{mm}$ 且表面覆盖

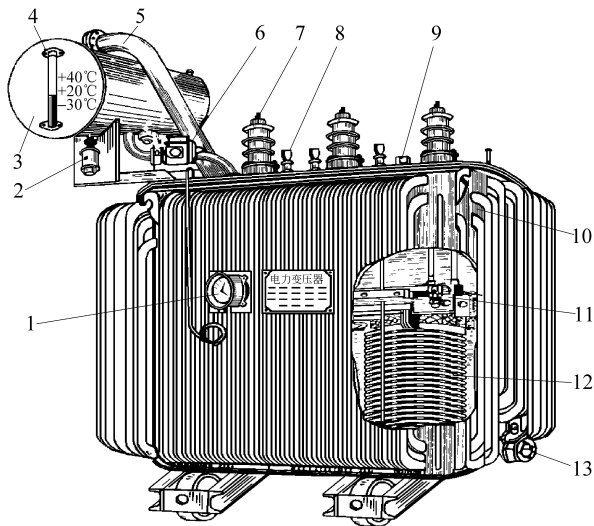


图 3-2 油浸式电力变压器

- 1—信号式温度计；2—吸湿器；3—储油柜；4—油表；5—安全气道；6—气体继电器；
7—高压套管；8—低压套管；9—分接开关；10—油箱；11—铁芯；12—线圈；13—放油阀门

有绝缘层的热轧或冷轧硅钢片叠装而成。

铁芯的基本结构形式有心式和壳式两种。心式结构的特点是绕组包围着铁芯，如图 3-3(a)所示，这种结构比较简单，绕组的装配及绝缘也较容易，因此绝大部分国产变压器均采用心式结构。壳式结构的特点是铁芯包围着绕组，如图 3-3(b)所示，这种结构的机械强度较高，但制造工艺复杂，使用材料较多，因此目前除了容量很小的电源变压器以外，很少采用壳式结构。

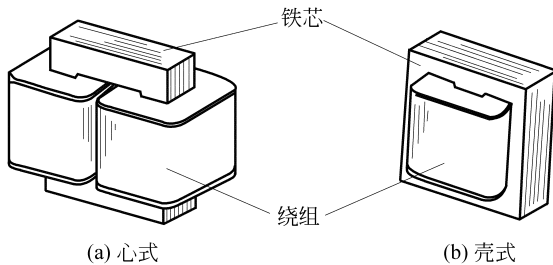


图 3-3 心式和壳式变压器

变压器铁芯的叠装方法：一般先将硅钢片裁成条形，然后再进行叠装。为了减少叠片接缝间隙以减小励磁电流，硅钢片在叠装时，一般采用叠接式，即上层和下层交错重叠的方式，如图 3-4 所示。

变压器容量不同，铁芯柱的截面形状也不一样。小容量变压器常采用矩形截面，大型变压器一般采用多级阶梯形截面，如图 3-5 所示。

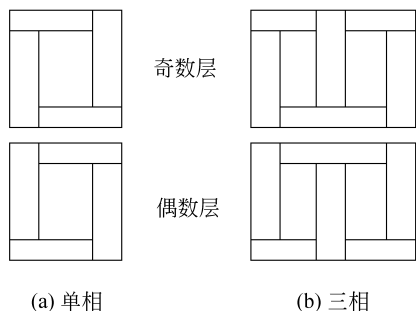


图 3-4 变压器铁芯的交错叠片

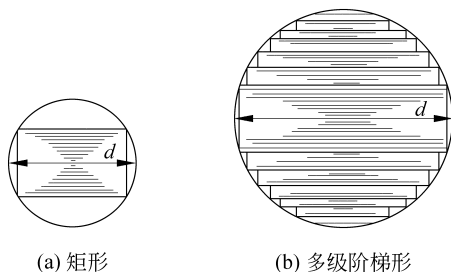


图 3-5 铁芯柱截面

2. 绕组

变压器的线圈通常称为绕组,绕组是变压器的电路部分,一般是由绝缘铜线或铝线绕制而成的。接于高压电网的绕组称为高压绕组,接于低压电网的绕组称为低压绕组。根据高、低压绕组在铁芯柱上排列方式的不同,变压器的绕组可分为同心式和交叠式两种。

(1) 同心式绕组。同心式绕组的高、低压绕组同心地套在铁芯柱上,如图 3-6 所示。为了便于绝缘,一般低压绕组套在里面,高压绕组套在外面。这种绕组具有结构简单,制造方便的特点,主要用在国产电力变压器中。

(2) 交叠式绕组。交叠式绕组一般都做成饼式,高、低压绕组交替地套在铁芯柱上,如图 3-7 所示。

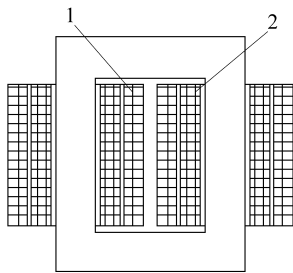


图 3-6 同心式绕组图

1—高压绕组; 2—低压绕组

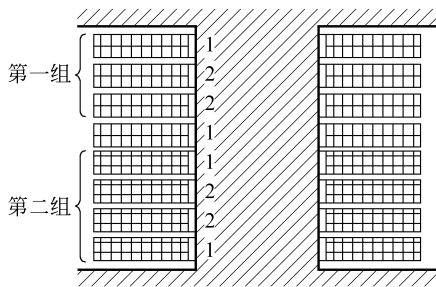


图 3-7 交叠式绕组

1—低压绕组; 2—高压绕组

为了便于绝缘,一般最上层和最下层的绕组都是低压绕组。这种绕组机械强度高,引线方便,漏电抗小,但绝缘比较复杂,主要用在大型电炉变压器中。

3. 油箱等其它附件

变压器除了器身之外,典型的油浸式电力变压器还有油箱、储油柜、绝缘套管、气体继电器、安全气道、分接开关等附件,如图 3-2 中所示,其作用是保证变压器的安全和可靠运行。

(1) 油箱。变压器的器身放置在装有变压器油的油箱内,变压器油是一种矿物油,具有很好的绝缘性能。变压器油起两个作用:一是在变压器绕组与绕组、绕组与铁芯及油箱之间起绝缘作用;二是变压器油受热后产生对流,对变压器铁芯和绕组起散热作用。油

箱的结构与变压器的容量、发热情况密切相关。变压器的容量越大,发热问题就越严重。在 20kV·A 及以下的小容量变压器中采用平板式油箱;一般容量稍大的变压器都采用排管式油箱,在油箱壁上焊有散热管,以增大油箱的散热面积。

(2) 储油柜。储油柜又称油枕,它是安装在油箱上面的圆筒形容器,它通过连通管与油箱相连,柜内油面高度随着油箱内变压器油的热胀冷缩而变动。储油柜的作用是保证变压器的器身始终浸在变压器油中,同时减少油和空气的接触面积,从而降低变压器油受潮和老化的速度。

(3) 绝缘套管。电力变压器的引出线从油箱内穿过油箱盖时,必须穿过瓷质的绝缘套管,以使带电的引出线与接地的油箱绝缘。绝缘套管的结构取决于电压等级,较低电压采用实心瓷套管;10~35kV 电压采用空心充气式或充油式套管;电压在 110kV 及以上时采用电容式套管。为了增加表面爬电距离,绝缘套管的外形做成多级伞形,电压越高,级数越多。

(4) 气体继电器(又称瓦斯继电器)。气体继电器装在油枕和油箱的连通管中间,当变压器内部发生故障(如绝缘击穿、匝间短路、铁芯事故等)产生气体时,或油箱漏油使油面降低时,气体继电器动作,发出信号,以便运行人员及时处理;若事故严重,可使断路器自动跳闸,对变压器起保护作用。

(5) 安全气道(又称防爆筒)。安全气道装于油箱顶部,是一个长钢圆筒,上端口装有一定厚度的玻璃板或酚醛纸板,下端口与油箱连通。其作用是当变压器内部因发生故障引起压力骤增时,让油气流冲破玻璃板或酚醛纸板释放出来,以免造成箱壁爆裂。

(6) 分接开关。油箱盖上面还装有分接开关,通过分接开关可改变变压器高压绕组的匝数,从而调节输出电压的大小。通常输出电压的调节范围是额定电压的±5%。

分接开关有两种形式:一种是只能在断电的情况下进行调节,称无载分接开关;另一种是可以在带负载的情况下进行调节,称为有载分接开关。

3.1.4 变压器的铭牌与主要系列

为了使变压器安全、经济、合理地运行,同时使用户对变压器的性能有所了解,变压器出厂时都安装了一块铭牌。在铭牌上标明了变压器的型号、额定值及其他有关数据。图 3-8 所示为三相电力变压器的铭牌。

铝线电力变压器					
产品标准			型号		SJL-560/10
额定容量	560kV·A	相数	3	额定频率	50Hz
额定电压	高压	10kV	额定电流	高压	32.3A
	低压	400~230V		低压	808A
使用条件	户外式		绕组温升65℃		油面温升55℃
短路电压	4.94%		冷却方式		油浸自冷式
油重370kg	器身重1040kg		总重1900kg		连接组Y, yn0
出厂序号		××× 厂		年 月 出品	

图 3-8 三相电力变压器的铭牌

1. 变压器的型号与主要系列

(1) 变压器的型号。变压器的型号表示了一台变压器的结构、额定容量、电压等级和冷却方式等内容。例如 SJL-560/10, 其中“S”表示三相, “J”表示油浸式, “L”表示铝导线, “560”表示额定容量为 $560\text{kV} \cdot \text{A}$, “10”表示高压绕组额定电压等级为 10kV 。

电力变压器的分类和型号如表 3-1 所示。

表 3-1 电力变压器的分类和型号

代表符号排列顺序	分 类	类 别	代表符号
1	绕组耦合方式	自耦	O
2	相数	单相	D
		三相	S
3	冷却方式	空气冷却	—
		油自然循环	—
		油浸式	J
		风冷	F
		水冷	W
		强迫油循环风冷	FP
		强迫油循环水冷	WP
4	绕组数	双绕组	—
		三绕组	S
5	绕组导线材质	铜	—
		铝	L
6	调压方式	无励磁调压	—
		有励磁调压	Z

(2) 变压器的主要系列。目前我国生产的各种系列变压器产品有 SJL1(三相油浸铝线电力变压器)、SL7(三相铝线低损耗电力变压器)、S7 和 S9(三相铜线低损耗电力变压器)、SFL1(三相油浸风冷铝线电力变压器)、SFPSL1(三相强油风冷三线圈铝线电力变压器)、SWP0(三相强油水冷自耦电力变压器)等,基本上满足了国民经济各部门发展的要求。

2. 变压器的额定值

额定值是对变压器正常工作状态所作的规定,它是正确使用变压器的依据。

(1) 额定容量 S_N 。额定容量 S_N 指变压器在额定工作条件下所能输出的视在功率,单位为 $\text{V} \cdot \text{A}$ 或 $\text{kV} \cdot \text{A}$ 。由于变压器效率高,通常一次侧、二次侧的额定容量设计相等。对三相变压器而言,额定容量指三相容量之和。

(2) 额定电压 U_{1N} 和 U_{2N} 。 U_{1N} 是指加在变压器一次绕组上的额定电源电压值, U_{2N} 是指变压器一次绕组加额定电压,二次绕组开路时的空载电压值。单位为 V 或 kV 。对三相变压器而言,额定电压是指空载线电压。

(3) 额定电流 I_{1N} 和 I_{2N} 。额定电流 I_{1N} 和 I_{2N} 指变压器在额定负载情况下,各绕组长

期允许通过的电流,单位为 A。 I_{1N} 是指一次绕组的额定电流; I_{2N} 是指二次绕组的额定电流。对三相变压器而言,额定电流是指线电流。

对单相变压器

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}}; \quad I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} \quad (3-4)$$

对三相变压器

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}; \quad I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} \quad (3-5)$$

(4) 额定频率 f_N 。我国规定标准工业用电的频率即工频为 50Hz。

(5) 联结组标号。联结组标号指三相变压器一、二次绕组的联结方式,Y 表示高压绕组作星形联结;y 表示低压绕组作星形联结;D 表示高压绕组作三角形联结;d 表示低压绕组作三角形联结;n 表示低压绕组作星形联结时的中性线。

(6) 阻抗电压。阻抗电压又称为短路电压,它标志着在额定电流时变压器阻抗压降的大小,通常用它与额定电压的百分比来表示。

此外,额定运行时变压器的效率、温升等数据均属于额定值。除额定值外,铭牌上还标有变压器的相数、变压器的运行方式及冷却方式等。为考虑运输,有时铭牌上还标出变压器的总重、油重、器身重量和外形尺寸等附属数据。

3.2 课题 单相变压器的空载运行

本节介绍的是单相变压器,但分析研究所得结论同样适用于三相变压器的对称运行。

变压器的空载运行是指变压器一次绕组接在额定频率和额定电压的交流电源上,而二次绕组开路时的运行状态如图 3-9 所示。

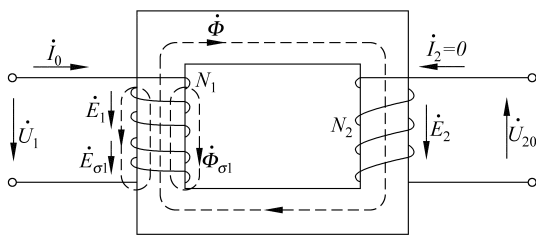


图 3-9 变压器的空载运行

3.2.1 变压器空载运行时的电磁关系

1. 变压器中各量参考方向的规定

由于变压器中电压、电流、磁通及电动势的大小和方向都是随时间作周期性变化的,因此它们的参考方向原则上是可以任意规定的。为了能正确表明各量之间的关系,必须首先规定它们的参考方向,或称为正方向。

为了统一起见,习惯上都按照“电工惯例”来规定参考方向,具体如下:

(1) 电压 u 的参考方向与电流 i 的参考方向一致,即符合关联方向。

- (2) 由电流 i 产生的磁动势所建立的磁通 Φ 与电流 i 的参考方向符合右手螺旋定则。
- (3) 由磁通 Φ 产生的感应电动势 e 的参考方向与产生磁通 Φ 的电流 i 的参考方向一致, 并有 $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ 的关系即符合关联方向, 即 e 与 i 符合右手螺旋定则。

图 3-9 中各量的参考方向就是根据上述规定来确定的。

2. 空载运行时各电磁量之间的关系

当一次绕组加上交流电压 $\dot{U}_1$, 二次绕组开路时, 一次绕组中便有空载电流 $\dot{I}_0$ 流过, 由于变压器为空载运行, 此时二次绕组中没有电流, 即 $\dot{I}_2 = 0$ 。空载电流 $\dot{I}_0$ 在一次绕组中产生空载磁动势 $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1$, 并建立空载时的磁场, 由于铁芯的磁导率比空气或油的磁导率大得多, 因此绝大部分磁通通过铁芯闭合, 同时交链一、二次绕组, 这部分磁通称作主磁通; 另一小部分磁通过空气或变压器油(非铁磁性介质)闭合, 只交链一次绕组, 这部分磁通称作漏磁通。根据电磁感应原理, 主磁通 $\dot{\Phi}$ 在一、二次绕组中感应出电动势 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$, 漏磁通 $\dot{\Phi}_{\sigma 1}$ 只在一次绕组中感应漏电动势 $\dot{E}_{\sigma 1}$, 另外空载电流 $\dot{I}_0$ 流过一次绕组的电阻 r_1 还会产生电阻压降 $\dot{I}_0 r_1$ 。此过程的电磁关系可用图 3-10 表示。

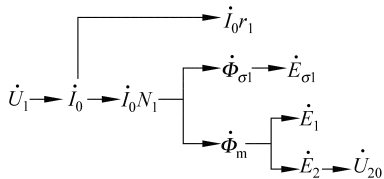


图 3-10 空载运行时的各电磁量间的关系

由于路径不同, 主磁通和漏磁通有以下差异:

- (1) 在性质上, 主磁通磁路由铁磁材料组成, 具有饱和特性, Φ 与 I_0 呈非线性关系, 而漏磁通磁路不饱和, $\Phi_{\sigma 1}$ 与 I_0 呈线性关系;
- (2) 在数量上, 因为铁芯的磁导率比空气(或变压器油)的磁导率大很多, 铁芯磁阻小, 所以磁通的绝大部分通过铁芯而闭合, 故主磁通远大于漏磁通, 一般主磁通可占总磁通的 99% 以上, 而漏磁通仅占 1% 以下;
- (3) 在作用上, 主磁通在二次绕组中感应电动势, 若接负载, 就有电功率输出, 故起了传递能量的媒介作用; 而漏磁通只在一次绕组中感应漏磁电动势, 仅起漏抗压降的作用。在分析变压器时, 把这两部分磁通分开, 即可把非线性问题和线性问题分别予以处理, 便于考虑它们在电磁关系上的特点。在其他交流电机中, 一般也采用这种分析方法。

3.2.2 变压器空载时的感应电动势

1. 主磁通感应的感应电动势

若主磁通按正弦规律变化, 即

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (3-6)$$

按照图 3-9 中参考方向的规定, 则绕组感应电动势的瞬时值为

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t = \omega N_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \\ &= E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (3-7)$$

$$\begin{aligned}
 e_2 &= -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega N_2 \Phi_m \cos \omega t = \omega N_2 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \\
 &= E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ)
 \end{aligned} \quad (3-8)$$

由上式可知,当主磁通 Φ 按正弦规律变化时,电动势 e_1 、 e_2 也按正弦规律变化,但 e_1 、 e_2 滞后于磁通 Φ 90° ,且感应电动势的有效值为

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (3-9)$$

同理

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (3-10)$$

故电动势与主磁通的相量关系为

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_1 &= -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m \\ \dot{E}_2 &= -j4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m \end{aligned} \right\} \quad (3-11)$$

从上面的表达式中可以看出,当主磁通按正弦规律变化时,一、二次绕组中的感应电动势也按正弦规律变化,其大小与电源频率、绕组匝数及主磁通最大值成正比,且在相位上滞后于主磁通 90° 。

2. 漏磁通感应的电动势

漏磁通感应的电动势的有效值相量表示为

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_{\sigma 1m} \quad (3-12)$$

式中, $\dot{\Phi}_{\sigma 1m}$ 为一次漏磁通最大值。

为了简化分析或计算,通常根据电工基础知识把上式由电磁表达形式转化为习惯的电路表达形式,即

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j \dot{I}_0 \omega L_{\sigma 1} = -j \dot{I}_0 X_{\sigma 1} \quad (3-13)$$

式中, $L_{\sigma 1}$ 为一次绕组的漏电感; $X_{\sigma 1}$ 为一次绕组漏电抗,反映漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$ 对一次侧电路的电磁效应, $X_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1}$ 。

由于漏磁通的路径是非铁磁性物质,磁路不会饱和,是线性磁路,因此对已制成的变压器,漏电感 $L_{\sigma 1}$ 为常数,当频率 f 一定时,漏电抗 $X_{\sigma 1}$ 也是常数。

3.2.3 变压器的空载电流和空载损耗

1. 空载电流

变压器空载运行时,一次绕组的电流称为空载电流。空载电流主要用来建立主磁通,所以又称励磁电流。空载时,变压器实际上是一个铁芯线圈,空载电流的大小主要取决于铁芯线圈的电抗和铁芯损耗。铁芯线圈的电抗正比于线圈匝数的平方和磁路的磁导,因此空载电流的大小与铁芯的磁化性能、饱和程度等有着密切的关系。

如果铁芯没有饱和,且忽略铁芯中的损耗时,此时的空载电流纯粹为建立主磁通的无功电流,称为磁化电流 i_μ 。当主磁通 Φ 按正弦变化时,空载电流 i_0 (或 i_μ) 也将按正弦变化,且与 Φ 同相。但实际上为了充分利用有效材料,变压器的铁芯总是设计得比较饱和,