



中央广播电视大学教材

电机与拖动学习 指导书

DIANJI YU TUODONG

王岩 周远程

丁淑敏 编



中央广播电视大学出版社

前 言

本书为中央广播电视大学电气工程类工业自动化专业学生用书,与周绍英、牛秀岩编写的《电机与拖动》(1994年中央广播电视大学出版社出版)主教材配套使用。书中分章对教学内容进行辅导,适当补充必要的例题,并对思考题及习题进行了选解。

本书由中央广播电视大学王岩、周远程和南京广播电视大学丁淑敏编写。其中一、二、四章由周远程编写,三、五、六章由王岩编写,七、八、九、十章由丁淑敏编写。由王岩统稿。

由于我们水平有限,时间仓促,书中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

1994年12月

目 录

第一章	变压器.....	(1)
第二章	电力拖动系统的动力学	(21)
第三章	直流电机原理	(29)
第四章	直流电动机的电力拖动	(37)
第五章	交流电机电枢绕组的感应电动势和磁势	(50)
第六章	三相同步电动机	(53)
第七章	三相异步电动机	(56)
第八章	三相异步电动机的电力拖动	(62)
第九章	电力拖动系统中电动机的选择	(70)
第十章	微控电机	(75)

第一章 变 压 器

一、内容辅导

1. 本章主要讲述变压器的用途、结构、额定数据,变压器的工作原理、运行状态,参数测定方法、运行特性,三相变压器联接组别的确定方法,简要介绍三相变压器的并联运行、自耦变压器及交流互感器。

变压器的电磁关系;变压器的分析方法及计算方法——折合算法及其折算后所得到的基本方程式,等值电路和相量图;联接组别的确定是本章学习的重点。

变压器铭牌上标注的额定数据的物理含义及彼此间的关系要搞清楚。要特别注意三相变压器的额定电压和额定电流均为线值,公式中有系数 $\sqrt{3}$ 。

单相变压器的额定容量为

$$S_e = U_{1e} I_{1e} = U_{2e} I_{2e}$$

三相变压器的额定容量为

$$S_e = \sqrt{3} U_{1e} I_{1e} = \sqrt{3} U_{2e} I_{2e}$$

变压器的空载运行的物理状况,各电磁量假设正方向的惯例;基本电磁关系;空载电流;空载运行时的相量图;空载运行的等值电路,这些内容是本章的基础,要好好掌握。对于什么是空载运行要有明确的认识。

对于变压器要进行分析计算,需要在电压、电流、磁通各量规定了正方向的前提下进行。各量正方向都有习惯的规定方法,详见教材,教材中图 1-11 是一台单相变压器各量正方向示意图,要对照图形熟悉各量假设正方向的确定方法。

按照惯例假设的正方向电磁感应定律的数学表达式为

$$e_1 = -W_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_2 = -W_2 \frac{d\phi}{dt}$$

当 ϕ 按正弦规律变化时,即 $\phi = \Phi_m \sin \omega t$ 时, e_1, e_2 也是正弦变化的,只是它们的相位都落后于 ϕ 90° ,用相量可表示为:

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f W_1 \Phi_m$$

$$\dot{E}_2 = -j4.44 f W_2 \Phi_m$$

空载运行时变压器原绕组有漏感电势 $E_{o1} = -jx_1 I_0$ 。空载运行时电势平衡方程式为

$$\begin{aligned} U_1 &= -\dot{E}_1 - \dot{E}_{o1} + I_0 r_1 \\ &= -\dot{E}_1 + I_0 r_1 + j I_0 x_1 \\ &= -\dot{E}_1 + I_0 Z_1 \end{aligned}$$

由于 Z_1 和 I_0 都很小,认为 U_1 与 $-\dot{E}_1$ 近似相等即 $U_1 \approx -\dot{E}_1 = j4.44 f W_1 \Phi_m$ 。

空载运行时由于副绕组无电流,故其端电压即为感应电势。

$$U_{20} = \dot{E}_2 = -j4.44 f W_2 \Phi_m$$

变压器的变比 k

$$k = \frac{W_1}{W_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

由于空载电流中的有功分量 I_{ϕ} 很小, 所以分析变压器中, 近似认为 $I_{\phi} = I_0$, 即 I_0 称为变压器的磁化电流或励磁电流。

上面提出了变压器空载运行时各个电磁量及其关系式, 若用相量图表示则更为形象清晰。绘图步骤见教材上册第 7 页, 图形见教材图 1-13。作图时只有弄清楚了各量间的相位关系才能画好。

2. 空载运行时的等值电路

为了对变压器的分析和计算更方便, 用一个既与变压器的电磁关系等值, 又不改变电磁关系的线性电路代替变压器, 这个电路就称为变压器的等值电路。

我们知道变压器的电势平衡方程式为

$$\begin{aligned} U_1 &= -E_1 + I_0 r_1 + j I_0 x_1 \\ &= -E_1 + I_0 Z_1 \end{aligned}$$

对于漏感电势 E_1 我们看作是 I_0 在漏电抗 x_1 上的压降, 同样也可把 E_1 看作是 I_0 在一个电抗和电阻上的(串联的)压降。这两个参数用 x_m 和 r_m 表示。 $-E_1$ 可用下式表示

$$\begin{aligned} -E_1 &= I_0 (r_m + j x_m) \\ &= I_0 Z_m \end{aligned}$$

那么电势平衡方程式则可写成

$$U_1 = I_0 (r_m + j x_m) + I_0 (r_1 + j x_1)$$

根据此式就可以画出如教材图 1-14b 所示的变压器空载运行时的等值电路。

这里有几个参数的物理意义应弄清楚: x_m 是对应主磁通的电抗, r_m 是反映铁损大小的等值电阻, 设置它是使 I_0 在其上产生的损耗与实际损耗等效。

变压器负载运行时情况比空载运行时复杂, 此时副绕组电流 I_2 在绕组 W_2 中建立磁势 $F_2 = I_2 W_2$, 它力图使主磁通 Φ_m 减小, 由于 $U_2 \approx E_2$ 而 U_1 不变, 所以 E_1 近于不变, 从而 Φ_m 也近于不变, 那么负载运行时的励磁磁势也就是空载时的励磁磁势 $I_0 W_1$, 为抵消副绕组磁势的作用, 原绕组的磁势应增加到 $I_1 W_1$, 以达到磁势平衡。即

$$I_1 W_1 = I_0 W_1 + (-I_2 W_2) \text{ (或 } F_1 = F_0 + (-F_2) \text{)}$$

上式表明, 变压器负载运行时, 原绕组的磁势有两个分量: 一个是励磁磁势 $I_0 W_1$, 一个是负载分量 $-I_2 W_2$ 。 $I_0 W_1$ 用来产生主磁通, 后者 $-I_2 W_2$ 用来抵消或平衡 F_2 。上面的方程式可写成:

$$I_0 W_1 = I_1 W_1 + I_2 W_2 \text{ (或 } F_0 = F_1 + F_2 \text{)}$$

可以看出变压器负载运行时, 励磁磁势是由原、副绕组磁势合成产生的。

由于 $I_0 \ll I_1$, 在忽略 I_0 时, 原、副绕组电流关系变为:

$$I_1 = -I_2 / k$$

其有效值关系为:

$$I_1 = I_2 / k$$

上面讲到副绕组磁势 $I_2 W_2$ 对主磁通的作用, 但它还在副绕组产生漏磁通 $\Phi_{\sigma 2}$, $\Phi_{\sigma 2}$ 在副绕组中感生漏感电势 $E_{\sigma 2}$, 它也可以表示为

$$\dot{E}_2 = -j\omega L_2 \dot{I}_2 = -j\dot{I}_2 x_2$$

式中 L_2 、 x_2 分别为副绕组的漏感系数和漏电抗。

根据以上分析可以画出原、副边的电路图,如教材图 1-16 所示。依据电路定律和假设正方向,列出变压器负载运行时的基本方程式如下:

$$U_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1$$

$$\dot{U}_2 = -\dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j\dot{I}_2 x_2$$

$$\dot{E}_1 = k\dot{E}_2$$

$$\dot{I}_0 W_1 = \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2$$

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

$$U_2 = \dot{I}_2 Z_{fs}$$

有这六个方程式,可以对变压器进行定量计算,但很不方便。为了使问题简化引入了折合算法。

折合算法,就是用一个匝数与原绕组匝数相等,电磁效应与副绕组相同的绕组去代替实际的副绕组,经折算后,副绕组各物理量称为副边折合到原边的折合值。各量符号右上角加“'”以示区别。各量的折合值为:

$$(1) \dot{I}_2' = \frac{W_2}{W_1} \dot{I}_2 = \frac{1}{k} \dot{I}_2$$

$$(2) \dot{E}_2' = \dot{E}_1 = k\dot{E}_2$$

$$(3) r_2' = \left(\frac{I_2}{I_2'} \right)^2 r_2 = k^2 r_2$$

$$(4) x_2' = k^2 x_2$$

$$(5) \dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2' = k\dot{E}_2 - \frac{1}{k} \dot{I}_2 k^2 Z_2 = k(\dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2) \\ = k\dot{U}_2$$

$$(6) Z_{fs}' = \frac{\dot{U}_2'}{\dot{I}_2'} = \frac{k\dot{U}_2}{\frac{1}{k}\dot{I}_2} = k^2 \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = k^2 Z_{fs}$$

折算后,变压器负载运行时的基本方程式为

$$U_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1$$

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2'$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_0$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$$

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

$$\dot{U}_2' = \dot{I}_2' Z_{fs}'$$

根据折算后的方程式可以画出“T”形等值电路和“π”形等值电路。如教材图 1-17、图 1-18 所示。因为 $I_1 \gg I_0$, I_0 可忽略不计,而将励磁支路去掉,使等值电路进一步简化成一字形等值电路,如教材中图 1-19 所示。其参数用短路电阻 r_k 、短路电抗 x_k 、短路阻抗 Z_k 表示,其值可由短路试验求得。

由折合前后参数的关系式可得出这样的结论:即副边向原边折算,折算值凡单位为伏特的值是折合前的 k 倍,凡以安培为单位的值为折合前的 $1/k$ 倍,凡以欧姆为单位的值为折合前的

k^2 倍。而原边向副边折算,其折算值和折合前的值的关系倍数是颠倒的。

3. 变压器负载运行时的相量图

相量图是变压器基本方程式的图示表示法。一般的绘图是根据给定条件和负载性质进行,具体绘制变压器负载运行时相量图的步骤教材第 25 页有详细介绍。

基本方程式、等值电路,相量图这三种方法,前两种方法进行定量计算较为方便;在讨论变压器各物理量的大小和相位时,用相量图较为方便。

变压器一些参数要通过试验测定。通过空载试验求出变压器的变比 k 、铁损耗 P_{Fe} 和励磁阻抗 Z_m 。通过短路试验求出变压器的短路阻抗和变压器的铜损耗。参数的测定中要明白为什么空载试验要在低压边做,而短路试验要在高压边做。要清楚通过试验测得的 U_{10} 、 I_{20} 、 P_0 求 r_m 、 Z_m 、 x_m 的过程。注意利用下组关系式:

$$\text{励磁电阻 } r'_m \approx P_0 / I_{20}^2$$

$$\text{励磁阻抗 } Z'_m \approx U_{2e} / I_{2e}$$

$$\text{励磁电抗 } x'_m \approx \sqrt{Z_m'^2 - r_m'^2}$$

求得的参数是低压边的,还应将它们乘以 k^2 才是高压边的 r_m 、 Z_m 、 x_m 。

短路试验所求参数用如下关系式求得:

$$\text{短路阻抗 } Z_K = \frac{U_K}{I_K} = \frac{U_K}{I_{1e}}$$

$$\text{短路电阻 } r_K = \frac{P_K}{I_K^2} = \frac{P_K}{I_{1e}^2}$$

$$\text{短路电抗 } x_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}$$

变压器的标么值是某物理量与选定的同单位的基值的比值,是相对值。要注意基值的选取,一般都选额定值,阻抗基值是额定电压与额定电流的比值。采用标么值有四点好处,见教材第 32 页。

变压器运行中,当原边所加电压与副边的负载功率因数 $\cos\varphi_2$ 不变时,副边端电压 U_2 随负载电流 I_2 变化, U_2 随 I_2 变化而变化的规律称为变压器的外特性,即 $U_2 = f(I_2)$,如教材中图 1-27 所示。

变压器带负载运行时,由于原、副边有电流和原、副边存在漏阻抗,故副边电压发生变化,其电压变化率(或电压调整率)用下式表示:

$$\Delta U = \frac{U_{2e} - U_2}{U_{2e}} \times 100\% = \frac{U_{1e} - U_2}{U_{1e}} \times 100\%$$

由教材图 1-28 所示的简化相量图导出下面的计算公式:

$$\Delta U = \beta \left(\frac{I_{1e} r_K \cos\varphi_2 + I_{1e} x_K \sin\varphi_2}{U_{1e}} \times 100\% \right)$$

ΔU 还可表示为:

$$\Delta U = \beta (r_K^* \cos\varphi_2 + x_K^* \sin\varphi_2)$$

变压器是效率很高的电气设备,负载运行时 $\cos\varphi_2$ 一定,变压器的效率可表示如下:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}} \times 100\%$$

$$= \left(1 - \frac{\beta^2 p_K + p_0}{\beta S \cos \varphi_2 + \beta^2 p_K + p_0} \right) \times 100\%$$

$\eta = f(\beta)$ 称变压器的效率特性。

变压器的联接组别是本章重点内容之一,要熟练掌握。已知变压器绕组接线和极性端,通过画相量图来判定联接组别。确定联接组别的步骤见教材第 41~44 页。要能判定准确,一定要弄清绕组的极性,相量要画得正确。联接组别的具体判定过程见教材。

三相变压器的并联运行是变压器实际的经常运行方式。并联运行有三个条件:①变比相同,②联接组别相同,③短路阻抗标么值相等。第二条必须满足,不能有一点差错。

本章介绍的特殊变压器有自耦变压器。自耦变压器的容量与绕组的容量不相等,后者是前者的 $\left(1 - \frac{1}{k} \right)$ 倍。

本章还介绍了交流互感器,对互感器要有接地保护措施,以保人员和设备的安全。电流互感器副边绝对不允许开路,电压互感器副边绝对不允许短路。

在基本工程计算中,对于单相变压器,用等值电路计算是不会错的,对三相变压器,必须首先把有关电压、电流、功率等都换成相值,然后再计算,所得结果再换成线值及三三相的值。在进行线值和相值的换算时要注意绕组是 Y 接还是 D 接以便换算正确,否则就会出错。

在使用等值电路与基本方程式时,若原边为实际值,副边则为折合值,包括电压、电势、电流和参数在内,因此负载阻抗及副边漏阻抗都要先折合到原边后再计算,所得结果副边的均为折合值,要得实际值时还得换算回副边。

空载时须用“T”形等值电路进行计算;负载运行时亦可用“T”形等值电路,但采用一字形等值电路计算更方便,可大大减少计算量。一字形等值电路还可用于副边稳定短路时短路电流等的计算和短路试验时的参数计算。

短路试验所得 r_K 的值应换算成工作温度 75°C 时的值,对于铜线电阻,其换算公式为:

$$r_{K75^\circ\text{C}} = \frac{234.5 + 75}{234.5 + \theta} r_K$$

其中 θ 为试验时的室温。

二、补充举例

例 1-1 一台三相变压器, $S_e = 3150\text{kVA}$, $U_{1e}/U_{2e} = 10\text{kV}/6.3\text{kV}$, Y, d11 接法。每相参数为 $r_1 = 0.16\Omega$, $x_1 = 0.82\Omega$, $r_2 = 0.18\Omega$, $x_2 = 0.88\Omega$ 。若接三相对称三角形接法纯电阻负载运行,每相负载的 $R_L = 40\Omega$,试计算:

- (1) 变压器的负载系数;
- (2) 副边电压变化率和效率。

解

(1) 变压器负载系数计算

① 原边额定相电压

$$U_1 = \frac{10 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 5773.5 (\text{V})$$

② 变压器变比

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{5773.5}{6300} = 0.9164$$

③每相输入阻抗(采用一字形等值电路)

$$\begin{aligned} Z &= r_1 + jx_1 + k^2(r_2 + jx_2 + R_{fs}) \\ &= 0.16 + j0.82 + 0.9164^2(0.18 + j0.88 + 40) \\ &= 33.9 + j1.56 = 33.94 \angle 2.63^\circ (\Omega) \end{aligned}$$

④原边每相电流

$$I_1 = \frac{U_1}{Z} = \frac{5773.5 \angle 0^\circ}{33.94 \angle 2.63^\circ} = 170.1 \angle -2.63^\circ (\text{A})$$

⑤原边每相电流额定值

$$I_{1e} = \frac{S_e}{\sqrt{3} U_{1e}} = \frac{3150 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10^4} = 181.87 (\text{A})$$

⑥负载系数 β 为

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1e}} = \frac{170.1}{181.87} = 0.9353$$

(2) 变压器副边电压变化率及效率计算

①副边每相电流

$$I_2 = k I_1 = 0.9164 \times 170.1 = 155.88 (\text{A})$$

②副边每相电压

$$U_2 = I_2 R_{fs} = 155.88 \times 40 = 6235.2 (\text{V})$$

③副边电压变化率

$$\Delta U = \frac{U_{2e} - U_2}{U_{2e}} = \frac{6300 - 6235.2}{6300} = 1.03\%$$

④变压器输入有功功率

$$\begin{aligned} P_1 &= \sqrt{3} U_{1e} I_1 \cos \varphi_1 = \sqrt{3} \times 10 \times 10^3 \times 170.1 \times \cos 2.63^\circ \\ &= 2943.012 (\text{kW}) \end{aligned}$$

⑤变压器输出有功功率

$$\begin{aligned} P_2 &= \sqrt{3} U_2 \sqrt{3} I_2 \cos \varphi_2 = 3 \times 6235.2 \times 155.88 \times 1 \\ &= 2915.829 (\text{kW}) \end{aligned}$$

⑥变压器效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{2915.829 \times 10^3}{2943.012 \times 10^3} = 99.08\%$$

三、思考题及习题选解

1-1 什么是变压器? 它有什么用途? 为什么高压输电比低压输电经济?

答 变压器是通过电磁感应原理, 把某一种电压等级的交流电能转换成频率相同的另一种电压等级的交流电能的静止的能量传输设备。

变压器的用途有: 经济地输送电能; 合理地分配电能; 安全地使用电能。

当输送电的容量一定时, 电压高可以减小传输电流, 从而可以减小线路的损耗。电流减小, 输电线的载荷可以比低压输电时要小, 故可以节省材料。这样高压输电在容量相同的情况下比低压输电要经济。

1-3 变压器铁心为什么要做成闭合的? 如果铁心回路中有间隙, 对变压器有什么影响?

答 一台制好的变压器在额定电压下,铁心内主磁通大小是一定的。根据磁路欧姆定律,若磁路中磁通大小一定,磁阻小则磁动势小,励磁电流中 I_{0q} 小。变压器铁心做成闭合的,比起回路有间隙的情况,磁阻小得多, I_{0q} 也就小得多。如果铁心回路有一段间隙,不论是充满空气还是变压器油,由于磁阻很大,产生同样大小主磁通时所需励磁磁势很大,结果 I_{0q} 很大, I_{0q} 大,则变压器功率因数降低,从而使变压器性能降低。

1-4 变压器能否改变直流电压?为什么?

答 变压器不能改变直流电压,因为直流电流产生的磁势在铁心中产生恒定磁通,不产生感应电势,故副边无电压输出。

1-5 两台变压器的绕组如(教材)图 1-53(a)、(b)所示,主磁通 Φ_m 与感应电势 E_1 、 E_2 的正方向标注于图中,试写出两台变压器的原、副边绕组感应电势 E_1 和 E_2 与主磁通 Φ_m 的关系式。要求写出瞬时值表示 $e=f[\phi(t)]$ 和相量表示 $\dot{E}=f(\dot{\Phi}_m)$ 两种形式。

解

(a)图变压器的解为:

$$e_1 = W_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_1 = -E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$\dot{E}_1 = j4.44 f W_1 \dot{\Phi}_m$$

$$e_2 = W_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_2 = -E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$\dot{E}_2 = j4.44 f W_2 \dot{\Phi}_m$$

(b)图变压器的解为:

$$e_1 = W_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_1 = -E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$\dot{E}_1 = j4.44 f W_1 \dot{\Phi}_m$$

$$e_2 = -W_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_2 = E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$\dot{E}_2 = -j4.44 f W_2 \dot{\Phi}_m$$

1-7 一台单相变压器 $U_{1e}/U_{2e}=220V/110V$,如教材图 1-55 所示,当高压侧加 220V 电压时,空载电流为 I_0 ,主磁通为 Φ_m ,试求:

(1)若 X,a 联在一起,在 A,x 端加 330V 电压,求此时的空载电流和主磁通是多少?

(2)若 X,x 联在一起,在 A,a 端加 110V 电压,求此时的空载电流和主磁通各是多少?

解

(1)变压器变比 k 为

$$k = \frac{220}{110} = 2$$

所以原、副边匝数比为 2。X,a 联在一起,则 A,x 间的匝数为 A,X 间的 $\frac{3}{2}$ 倍,加在 A,x 间的电压也为 U_{1e} 的 $\frac{3}{2}$ 倍。根据 $U \approx E = 4.44 f W \dot{\Phi}_m$ 可知, $\dot{\Phi}_m$ 不变,励磁磁势 F_0 亦不变。设 A,X

匝数为 W_1 , 那么 W 则为 $\frac{3}{2}W_1$, 所以有 $I_0W_1 = I_0'W$, 即 $I_0' = \frac{W_1}{W}I_0 = \frac{W_1}{\frac{3}{2}W_1}I_0 = \frac{2}{3}I_0$, 由此可见 I_0'

减小了, 为原来的励磁电流的 $\frac{2}{3}$ 。

(2) X, x 联在一起, A, a 端之间的匝数(有效的)只有 $\frac{1}{2}W_1$, A, a 端此时所加电压也为 U_1 的 $\frac{1}{2}$, 根据 $U \approx E = 4.44fW\Phi_m$ 可知 Φ_m 不变, 所以有 $I_0W_1 = I_0'W$, 即 $I_0W_1 = I_0'W_1/2$, 所以 $I_0' = 2I_0$ 。

答案中 I_0 和 I_0' 分别为题(1)和(2)的励磁电流。

1-10 一台单相变压器, 额定电压为 $U_{1e}/U_{2e} = 380V/220V$, 额定频率为 $50Hz$, 试问:

(1) 如将低压绕组接到 $380V$ 电源上, 变压器会发生什么异常现象? 励磁电流 I_0 、励磁阻抗 Z_m 、铁耗 p_{Fe} 与正常情况相比会发生什么变化?

(2) 如果电压为额定值, 但频率比额定值高 20% , 那么 I_0 、 Z_m 、 p_{Fe} 三者又会发生怎样的变化?

(3) 如果将变压器误接到电压等于其额定电压的直流电源上时, 又会发生什么现象?

答

(1) 将低压绕组接到 $380V$ 电源上, 依据 $U \approx E = 4.44fW\Phi_m$, 显然 Φ_m 增加, 由于铁磁材料的饱和特性, I_0 将显著增加, Z_m 降低, 铁耗与磁通量约成平方关系, 致使 p_{Fe} 剧烈增长, 这造成绕组内电流铜耗、磁路中铁耗严重增加, 使变压器过热而损坏绝缘。

(2) 由 $U \approx E = 4.44fW\Phi_m$ 可见电压不变。当频率增加时, Φ_m 将减小, I_0 也减小而 Z_m 增加, 硅钢片的损耗中, 约 85% 为磁滞损耗, 15% 为涡流损耗, 磁滞损耗与频率一次方、磁通平方成正比, 涡流损耗与频率和磁通都是平方成正比关系, 由此可见, 频率增加时, I_0 和 p_{Fe} 减小而 Z_m 增加。

(3) 接到直流电源上时, 铁心中磁通是恒定的, 绕组中无感应电势与接入电压平衡, 原边的电流仅由绕组的直流电阻 r 限定, r 很小故电流这时相当大, 将使变压器绕组过热。

1-12 变压器的励磁阻抗 $Z_m = r_m + jx_m$ 与铁心的饱和程度有关系, 为什么对每台变压器给定一个确定的数值?

答

因为变压器正常运行时, 原边电压基本上就是额定电压值, 对应额定电压运行状态的铁心磁通基本不变, 即使电源电压有所波动, 磁通值也近似不变, 所以对每台变压器可以给定一确定的值 Z_m 。

1-14 变压器副边电流若分别为 $I_2 = 0$ 、 $0.5I_{2e}$ 和 I_{2e} 时, 原边电流各为多少? 与负载是电阻性、电感性或电容性有关系吗?

答

变压器副边电流 I_2 为 0 、 $0.5I_{2e}$ 和 I_{2e} 时, 原边电流对应为 $I_1 = I_0$ 、 $0.5I_{1e}$ 和 I_{1e} 。其值与负载性质无关。

1-15 一台单相变压器, 额定电压 $U_{1e}/U_{2e} = 1100V/220V$, 略去励磁电阻 r_m , 原边电阻 $r_1 = 0.05\Omega$, 原边漏电抗 $x_1 = 0.4\Omega$, 副边电阻 $r_2 = 0.002\Omega$, 副边漏电抗 $x_2 = 0.016\Omega$, $x_m = 220\Omega$, 当副边电压是额定值, 电流 $I_2 = 100A$, 功率因数是 0.6 (滞后)时, 求原边电流 I_1 及原边电压

U_1 ? 并说明 U_1 与 E_1 的关系。

解

变压器变比

$$k = \frac{U_{1e}}{U_{2e}} = \frac{1100}{220} = 5$$

负载阻抗

$$Z_{1e} = \frac{U_{2e}}{I_2} = \frac{220}{100} = 2.2(\Omega)$$

因为 $\cos\varphi=0.6$, 所以 $\sin\varphi=0.8$

所以 r_{1e} 为

$$r_{1e} = Z_{1e} \cos\varphi = 2.2 \times 0.6 = 1.32(\Omega)$$

$$x_{1e} = Z_{1e} \sin\varphi = 2.2 \times 0.8 = 1.76(\Omega)$$

副边参数折算值

$$r'_2 = k^2 r_2 = 5^2 \times 0.002 = 0.05(\Omega)$$

$$x'_2 = k^2 x_2 = 5^2 \times 0.016 = 0.40(\Omega)$$

$$r'_{1e} = k^2 r_{1e} = 5^2 \times 1.32 = 33(\Omega)$$

$$x'_{1e} = k^2 x_{1e} = 5^2 \times 1.76 = 44(\Omega)$$

$$\begin{aligned} Z'_{1e} &= k^2 Z_{1e} = r'_{1e} + jx'_{1e} = 33 + j44 \\ &= 55 \angle 53^\circ(\Omega) \end{aligned}$$

副边总阻抗

$$\begin{aligned} Z_2 + Z'_{1e} &= (r'_2 + jx'_2) + (r'_{1e} + jx'_{1e}) \\ &= (r'_2 + r'_{1e}) + j(x'_2 + x'_{1e}) \\ &= (0.05 + 33) + j(0.4 + 44) \\ &= 33.5 + j44.4 \\ &= 55.35 \angle 53.3^\circ(\Omega) \end{aligned}$$

副边电流折算值

$$I'_2 = \frac{I_2}{k} = \frac{100}{5} = 20(\text{A})$$

设副边输出电压初相位为 0° , 即

$$\dot{U}_2 = 220 \angle 0^\circ \text{V}$$

则

$$\dot{I}_2 = 100 \angle -53^\circ \text{A}$$

$$\dot{I}'_2 = 20 \angle -53^\circ \text{A}$$

副绕组感应电势

$$\begin{aligned} \dot{E}_2 &= \dot{I}'_2 (Z_2 + Z'_{1e}) \\ &= 20 \angle -53^\circ \times 55.35 \angle 53.3^\circ \\ &= 1107 \angle 0.3^\circ(\text{V}) \end{aligned}$$

励磁电流

$$\dot{I}_0 = -\frac{\dot{E}_1}{Z_m} = -\frac{\dot{E}_2}{jx_m}$$

$$= -\frac{1107 / 0.3^\circ}{220 / 90^\circ}$$

$$= 5.03 / 90.3^\circ (\text{A})$$

原边电流

$$I_1 = I_0 - I_2$$

$$= 5.03 / 90.3^\circ - 20 / -53^\circ$$

$$= j5.03 - 12 + j15$$

$$= -12 + j20.03$$

$$= 23.35 / 120.94^\circ (\text{A})$$

原边阻抗

$$Z_1 = r_1 + jx_1$$

$$= 0.05 + j0.4$$

$$= 0.403 / 82.9^\circ (\Omega)$$

原边电压

$$U_1 = -E_1 + I_1 Z_1$$

$$= -1107 / 0.3^\circ + 23.35 / 120.94^\circ \times 0.403 / 82.9^\circ$$

$$= -1107 / 0.3^\circ + 9.41 / 203.84^\circ$$

$$= -1107 - j5.756 - 8.61 - j3.8$$

$$= -1115.61 - j9.16$$

$$= -1115.65 / 180.5^\circ (\text{V})$$

由计算结果可以看出 U_1 与 E_1 其大小相差很小, U_1 超前 E_1 180.5°。

1-16 有一台单相变压器, 已知 $S_e = 10\text{kVA}$, $U_{1e}/U_{2e} = 380\text{V}/220\text{V}$, $r_1 = 0.14\Omega$, $r_2 = 0.035\Omega$, $x_1 = 0.22\Omega$, $x_2 = 0.055\Omega$, $r_m = 30\Omega$, $x_m = 310\Omega$ 。若原绕组加额定频率的额定电压, 并保持不变, 副绕组接负载阻抗 $Z_L = 4 + j3\Omega$, 试用“T”形、“Γ”形和简化的等值电路计算 $I_1, I_2, I_0, U_2, P_1, P_2, \eta, p_{Fe}, p_{Cu}$, 并对三种电路计算的结果作一比较。

解

变压器变比

$$k = \frac{U_{1e}}{U_{2e}} = \frac{380}{220} = \sqrt{3}$$

副边参数折合到原边的值

$$r'_2 = k^2 r_2 = (\sqrt{3})^2 \times 0.035 = 0.105 (\Omega)$$

$$x'_2 = k^2 x_2 = (\sqrt{3})^2 \times 0.055 = 0.165 (\Omega)$$

$$Z'_L = k^2 Z_L = (\sqrt{3})^2 \times (4 + j3) = 12 + j9 = 15 / 36.8^\circ (\Omega)$$

励磁阻抗

$$Z_m = r_m + jx_m = 30 + j310 = 311.4 / 84.5^\circ (\Omega)$$

Z'_2 与 Z'_L 之和

$$Z'_2 + Z'_L = 0.105 + j0.165 + 12 + j9$$

$$= 12.105 + j9.165$$

$$= 15.18 / 37.1^\circ (\Omega)$$

“T”形等值电路原边输入阻抗

$$\begin{aligned}
Z_{dx} &= Z_1 + \frac{Z_m(Z'_2 + Z'_{L2})}{Z_m + Z'_2 + Z'_{L2}} \\
&= 0.14 + j0.22 + \frac{311.4 / 84.5^\circ \times 15.18 / 37.1^\circ}{30 + j310 + 12.105 + j9.165} \\
&= 0.14 + j0.22 + \frac{4727 / 121.6^\circ}{42.105 + j319.165} \\
&= 0.14 + j0.22 + \frac{4727 / 121.6^\circ}{322 / 82.5^\circ} \\
&= 0.14 + j0.22 + 14.68 / 39.1^\circ \\
&= 0.14 + j0.22 + 14.68 \cos 39.1^\circ + j14.68 \sin 39.1^\circ \\
&= 0.14 + j0.22 + 11.39 + j9.26 \\
&= 11.53 + j9.48 \\
&= 14.92 / 39.4^\circ (\Omega)
\end{aligned}$$

各电流值为

$$I_1 = \frac{U_{1e}}{Z_{dx}} = \frac{380 / 0^\circ}{14.92 / 39.4^\circ} = 25.47 / -39.4^\circ (\text{A})$$

$$\begin{aligned}
I_2 &= -I_1 \times \frac{Z_m}{Z_m + Z'_2 + Z'_{L2}} \\
&= -25.47 / -39.4^\circ \times \frac{311.4 / 84.5^\circ}{322 / 82.5^\circ} \\
&= -25.47 / -39.4^\circ \times 0.967 / 2^\circ \\
&= -24.63 / -37.4^\circ \\
&= 24.63 / 180^\circ - 37.4^\circ \\
&= 24.63 / 142.6^\circ (\text{A})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_2 &= kI_1 = \sqrt{3} \times 24.63 / 142.6^\circ \\
&= 42.66 / 142.6^\circ (\text{A})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_0 &= I_1 + I_2 \\
&= 25.47 / -39.4^\circ + 24.63 / 142.6^\circ \\
&= 19.68 - j16.17 - 19.57 + j14.96 \\
&= 0.11 - j1.21 = 1.21 / -84.8^\circ (\text{A})
\end{aligned}$$

副边电压

$$\begin{aligned}
U_2 &= I_2 Z'_{L2} \\
&= 24.63 / 142.6^\circ \times 15 / 36.8^\circ \\
&= 369.5 / 179.4^\circ (\text{V})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_2 &= \frac{1}{k} U'_2 \\
&= \frac{1}{\sqrt{3}} \times 369.5 / 179.4^\circ \\
&= 213.3 / 179.4^\circ (\text{V})
\end{aligned}$$

功率及效率

$$\begin{aligned}
P_1 &= U_1 I_1 \cos \varphi_1 \\
&= 380 \times 25.47 \cos 39.4^\circ
\end{aligned}$$

$$= 7478.98(\text{W})$$

$$\begin{aligned} P_2 &= U_2 I_2 \cos \varphi_2 \\ &= 213.3 \times 42.66 \cos 36.8^\circ \\ &= 7286.2(\text{W}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \\ &= \frac{7286.2}{7478.98} \times 100\% \\ &= 97.42\% \end{aligned}$$

损耗

$$\begin{aligned} p_{\text{Fe}} &= I_0^2 r_m = 1.21^2 \times 30 = 43.92(\text{W}) \\ p_{\text{Cu}} &= I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 \\ &= 25.47^2 \times 0.14 + 42.66^2 \times 0.035 \\ &= 154.52(\text{W}) \end{aligned}$$

“Γ”形等值电路原边输入阻抗

$$\begin{aligned} Z_{\text{dx}} &= \frac{Z_m(Z_1 + Z_2' + Z_{\text{Lx}})}{Z_1 + Z_2' + Z_{\text{Lx}} + Z_m} \\ &= \frac{311.4 / 84.5^\circ \times (0.14 + j0.22 + 12.105 + j9.165)}{0.14 + j0.22 + 42.105 + j319.165} \\ &= \frac{311.4 / 84.5^\circ \times (12.245 + j9.385)}{42.245 + j319.385} \\ &= \frac{311.4 / 84.5^\circ \times 15.43 / 37.47^\circ}{322.17 / 82.47^\circ} \\ &= \frac{4804.9 / 121.97^\circ}{322.17 / 82.47^\circ} \\ &= 14.9 / 39.5^\circ(\Omega) \end{aligned}$$

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_{\text{dx}}} = \frac{380 / 0^\circ}{14.9 / 39.5^\circ} = 25.5 / -39.5^\circ$$

$$\begin{aligned} -I_2 &= \frac{U_{\text{Lx}}}{Z_1 + Z_2' + Z_{\text{Lx}}} \\ &= \frac{380 / 0^\circ}{15.43 / 37.47^\circ} \\ &= 24.63 / -37.47^\circ(\text{A}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_2 &= 24.63 / 180^\circ - 37.47^\circ \\ &= 24.63 / 142.53^\circ(\text{A}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_2 &= k I_1 \\ &= \sqrt{3} \times 24.63 / 142.53^\circ \\ &= 42.66 / 142.53^\circ(\text{A}) \end{aligned}$$

副边电压

$$\begin{aligned} U_2 &= I_2 Z_{\text{Lx}} \\ &= 24.63 / 142.53^\circ \times 15 / 36.8^\circ \\ &= 369.45 / 179.33^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_2 &= \frac{1}{k} U_2' \\
 &= \frac{1}{\sqrt{3}} \times 369.45 \angle 179.33^\circ \\
 &= 213.3 \angle 179.33^\circ (\text{V})
 \end{aligned}$$

功率及效率

$$\begin{aligned}
 P_1 &= U_1 I_1 \cos \varphi_1 \\
 &= 380 \times 25.5 \cos 39.5^\circ \\
 &= 7477 (\text{W}) \\
 P_2 &= U_2 I_2 \cos \varphi_2 \\
 &= 213.3 \times 42.66 \times \cos 36.8^\circ \\
 &= 7286 (\text{W}) \\
 \eta &= \frac{P_2}{P_1} = \frac{7286}{7477} = 0.9745 = 97.45\% \\
 p_{Fe} &= I_0^2 r_m = \left(\frac{U_1}{Z_m} \right)^2 r_m \\
 &= \left(\frac{380}{311.4} \right)^2 \times 30 \\
 &= 44.7 (\text{W}) \\
 p_{Cu} &= I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 \\
 &= 25.5^2 \times 0.14 + 42.66^2 \times 0.035 \\
 &= 154.7 (\text{W})
 \end{aligned}$$

以简化等值电路计算各量

$$\begin{aligned}
 r_K &= r_1 + r_2' \\
 &= 0.14 + 0.105 = 0.245 (\Omega) \\
 x_K &= x_1 + x_2' \\
 &= 0.22 + 0.165 = 0.385 (\Omega) \\
 Z_{dx} &= Z_K + Z_{\Sigma} \\
 &= 0.245 + j0.385 + 12 + j9 \\
 &= 12.245 + j9.385 \\
 &= 15.43 \angle 37.47^\circ (\Omega) \\
 I_1 &= \frac{U_1}{Z_{dx}} \\
 &= \frac{380 \angle 0^\circ}{15.43 \angle 37.47^\circ} = 24.63 \angle -37.47^\circ (\text{A}) \\
 I_2 &= -I_1 = 24.63 \angle 180^\circ - 37.47^\circ \\
 &= 24.63 \angle 142.53^\circ (\text{A}) \\
 U_2 &= I_2 Z_{\Sigma} = 24.63 \angle 142.53^\circ \times 15 \angle 36.8^\circ \\
 &= 369.45 \angle 179.33^\circ (\text{A}) \\
 U_2 &= \frac{1}{k} U_2' \\
 &= \frac{1}{\sqrt{3}} \times 369.45 \angle 179.33^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 213.3 / 179.33^\circ (\text{V}) \\
P_1 &= U_1 I_1 \cos \varphi_1 \\
&= 380 \times 24.63 \cos 37.47^\circ \\
&= 380 \times 24.63 \times 0.793 \\
&= 7422 (\text{W}) \\
P_2 &= U_2 I_2 \cos \varphi_2 \\
&= 213.3 \times (\sqrt{3} I_2) \cos 36.8^\circ \\
&= 213.3 \times 42.66 \times 0.8007 \\
&= 7285.87 (\text{W}) \\
\eta &= \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \\
&= \frac{7285.87}{7422} \times 100\% = 98.17\% \\
p_{\text{Cu}} &= I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 \\
&= 24.63^2 \times 0.14 + 42.66^2 \times 0.035 \\
&= 148.62 (\text{W})
\end{aligned}$$

关于用三种等值电路的计算,读者可以自己进行比较。本习题计算量较大,但它是变压器各量计算的全面练习。要完成这道题,首先要能画出等值电路,掌握各种电路中都有一些什么参数,各量之间的关系。然后准确列出关系式并细心演算。

1-19 变压器的空载损耗为什么可以近似看成是铁耗? 短路损耗为什么可以近似看成是铜耗? 负载时的实际铁耗和铜耗,与空载试验和短路试验时测定的空载损耗和短路损耗有无差别,为什么?

答

空载时,电源电压为额定值,铁心中磁通密度达到正常运行的数值,铁耗也达到正常运行时的数值。而副边 $I_2=0$,无铜耗,原边电流空载时, I_0 远小于 I_{1e} ,因此它产生的原边绕组铜耗也很小,所以空载时变压器损耗可以近似看成是铁耗。

短路时,原、副绕组电流均为额定值,铜耗达到正常运行的数值,而短路电压比额定电压低很多,并且漏阻抗压降较大,使励磁电势 E_1 比正常运行时低得多,故铁心中磁密也比正常运行时低得多,铁耗与铜耗相比可以忽略不计,所以短路损耗可近似看成是铜耗。

负载时的实际铁耗和铜耗,与空载试验和短路试验时测定的空载损耗和短路损耗有差别。负载时的实际铁耗与空载的损耗之差近似认为是空载时铜耗,实际的铜耗与短路试验测定的短路损耗之差近似认为是短路时的铁耗。试验中测定损耗是含变压器的铁耗和铜耗,只是因为空载时铜耗很小,在工程计算处理中认为空载损耗就是铁耗,而忽略掉铜耗,短路试验时铁耗与铜耗相比很小,小到可以认为短路试验时损耗就是铜耗,实际的铜耗要比测定短路损耗小。

1-20 一台铝线三相变压器: $S_N=750\text{kVA}$, $U_{1e}/U_{2e}=10000\text{V}/400\text{V}$, Y, yn0 接法。

低压侧空载试验数据为: $U_{20}=400\text{V}$, $I_{20}=60\text{A}$, $P_0=3800\text{W}$ 。

高压侧短路实验数据为: $U_{1k}=440\text{V}$, $I_{1k}=43.3\text{A}$, $P_k=10900\text{W}$, 室温为 20°C 。试求:

(1) 变压器的参数,并画出等值电路;

(2) 当额定负载 $\cos \varphi_2=0.8$ (感性) 和 $\cos(-\varphi_2)=0.8$ (容性) 时,计算电压变化率 $\Delta U\%$,副