

1.1 内容提要

1.1.1 基本要求

1. 了解变压器的基本结构和分类；
2. 熟知变压器的额定值及其含义，并运用其计算变压器的额定电流；
3. 了解标幺值的概念及其在电机学中的运用。

1.1.2 掌握要点

1. 标幺值的概念与运用

标幺值的概念与运用在 1.2 节介绍。

2. 变压器的铭牌数据

变压器的铭牌数据主要包括额定容量 S_N 、额定电压 U_N 、额定电流 I_N 和额定频率 f_N 等。此外，在变压器的铭牌上还标注有相数、接线图、额定运行效率、阻抗压降和温升。对于特大型变压器还标注变压器的总质量、铁芯和绕组的质量以及储油量，供安装和检修时参考。

3. 根据变压器的铭牌数据计算其额定电流

根据变压器铭牌上的额定数据，可运用以下公式计算变压器的额定电流。

(1) 对于单相变压器

原边额定电流

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}}$$

副边额定电流

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}}$$

(2) 对于三相变压器

原边额定线电流

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}$$

副边额定线电流

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}$$

应该指出的是,对于三相变压器而言,铭牌上所标注的额定电压为线电压,以上计算得出的电流亦为线电流,容量为三相之值。

1.2 疑难剖析

本章的疑难问题是标幺(读 yao)值。

按理说标幺值不应该成为疑难问题,可不少教科书却开辟单独章节连篇累牍地讲述这个问题,反倒将此问题复杂化了,以至于不少学生学了半天,因不解其意,竟将其念成“标么(me)值”。其实,标幺值并不是电机学中的一个什么新鲜的物理概念,而只是初等数学中的一个数学概念。标幺值与百分值一样,就是人们所熟知的相对值。

相对值运用的方便之处为人尽知。比如,有人说某台电机此时的工作电流是 5 A,由于人们并不知道它的容量是多大,因此没人能知晓这台电机工作的状况:如若是一台微型电机,也许它早就烧坏了;如若是一台大型电机,也许只是处于空载。但如若告诉你其工作电流是 5%,你就一定知道它的工作状况了。

只是由于百分值的后面总跟着一个讨厌的百分号(%),这在电机学的大量运算中着实不方便。而百分值后之所以总跟着百分号,就是因为其概念是以“一百”作为基数,看实际值占其中的多少;如若以“一”作为基数,再来看实际值占其中的多少,就不会出现那个百分号了,而这就是所谓的标幺值。这么一说就很清楚了,标幺值就是将实际值标在基数“一”上的值,其结果是一个十进制的小数(只是有时并不为纯小数而已)。

与之类似,百分值就是标在基数“一百”上的值,从这个意义上讲,百分值可称为“标百值”。

那么,为什么要叫“标幺值”呢?其实,人们在电信领域中早就用到了这个“幺”字。由于辨音上的方便,人们将电报电话中的“0”、“1”、“2”和“7”,分别读成“洞”、“幺”、“两”和“拐”。而“1”又为什么要读成“幺”呢?这是因为在人的认知中,“1”是早期定义的自然数中最小的数(后来扩展到了 0),而“幺”字在我国民间就是“小”的意思。至今在湖南、江西和四川等地的农村,还有将“小妹”称为“幺妹”的习惯。

本书讲到此,读者应该对标幺值有一个正确的认识了。

在此将采用标幺值的优点综述如下:

- (1) 标幺值与百分值一样属一种相对值,因而其具有相对值运用的一切优点;
- (2) 不论电机的容量的大小,若用标幺值表示其参数及性能数据,其值一般均处于一个很狭窄的范围之内,便于对其的正确性进行判断;
- (3) 当采用标幺值后,电机的匝比便为 1,这样便可免除原副边各参数和物理量的折算过程,此时各参数和物理量的标幺值是一样的,可大大简化运算过程。

1.3 习题解答

1-1 为什么在电力系统中广泛应用变压器?试举几个在工业企业及其他行业中运用变压器的例子。

答 发电机发出的电压不可能太高,一般只有 $10.5\sim 20\text{ kV}$,要想将发出的大功率电能直接送到很远的用电区去,几乎是不可能的。这是因为,低电压大电流输电,除了在输电线路路上产生很大损耗外,线路上产生的压降也足以使电能送不出去。为此,需要用升压变压器将发电机端电压升高到较高的输电电压(当输电的功率一定时,电压升高,电流就减小),输送过程产生的损耗将降低,能比较经济地将电能送出去。一般地,当输电距离越远,输送的功率越大,要求的输电电压也越高。例如,输电距离为 $200\sim 400\text{ km}$,输送容量为 $200\sim 300\text{ GW}$ 的输电线,输电电压一般需要 220 kV ,输电距离在 1000 km 以上,则要求有更高的输电电压。

当电能送到用电地区,要用降压变压器将电压降低为配电电压,然后送到用电分区,最后再经配电变压器将电压降到用户所需要的电压等级,供用户使用。大型动力设备,采用 6 kV 或 10 kV ;小型动力设备和照明用电则为 $380\text{ V}/220\text{ V}$ 。为了将两个不同电压等级的电力系统彼此联系起来,常常用到三绕组变压器。此外,还有各种专门用途的变压器,如整流变压器、电炉变压器等。由此可见,变压器的用途十分广泛,其品种、规格也很多。简单的输配电系统如图 1-1 所示。

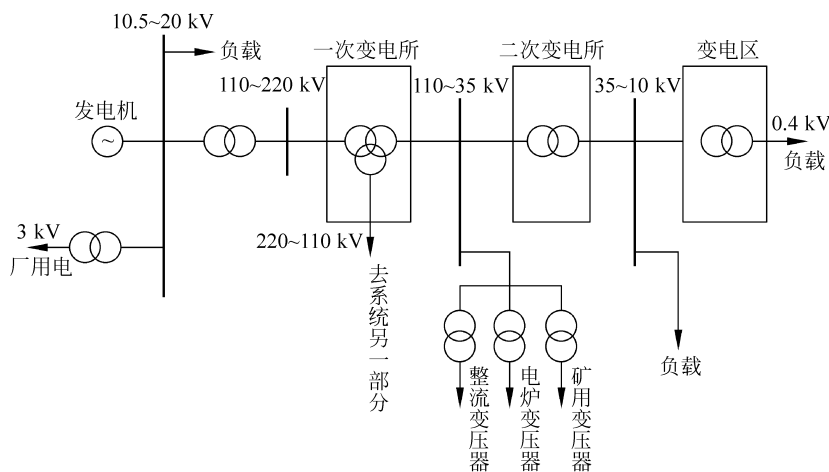


图 1-1 简单的输配电系统图

1-2 变压器有哪些主要部件？各部件起什么作用？

答 变压器的主要部件是高磁导率的闭合铁芯和套在铁芯上的一、二次绕组。铁芯构成了变压器磁路部分,绕组构成了变压器的电路部分。一、二次绕组通过铁芯磁路相耦合,从而可以利用电磁感应作用来实现对交流电能的变换。

1-3 简述变压器铁芯结构和绕组结构的形式。

答 变压器的铁芯用双面涂绝缘漆的硅钢片叠压而成,铁芯结构可以分为铁芯柱和铁轭,单相变压器有两个铁芯柱,三相变压器有三个铁芯柱。变压器的铁芯材料有芯式结构和壳式结构两种基本形式。

变压器绕组的基本形式有同心式和交叠式两种,芯式变压器常用同心式绕组、壳式变压器常用交叠式绕组。

1-4 铁芯的作用是什么？为什么要用厚 0.35 mm 、双面涂漆的硅钢片制造而成？

答 铁芯是变压器的主磁路,又是它的机械骨架。为了提高磁路的导磁性能,减少铁芯中的磁滞、涡流损耗,铁芯一般用高磁导率的厚 0.35 mm、双面涂漆的硅钢片叠压而成。

1-5 有一台单相变压器,额定容量 $S_N = 50 \text{ kV} \cdot \text{A}$,额定电压 $U_{1N}/U_{2N} = 220/36 \text{ V}$,求一、二次侧的额定电流。

解 一、二次侧额定电流分别为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{50\,000}{220} = 227.27(\text{A})$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{50\,000}{36} = 1388.89(\text{A})$$

1-6 有一台三相电力变压器,容量为 $S_N = 5000 \text{ kV} \cdot \text{A}$,一、二次绕组分别采用星形和三角形接法, $U_{1N}/U_{2N} = 10/6.3 \text{ kV}$,求:

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

解 (1) 由已知条件,一、二次侧额定线电压分别为

$$U_{1N} = 10 \text{ kV}, \quad U_{2N} = 6.3 \text{ kV}$$

一次绕组额定线电流为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 10} = 288.7(\text{A})$$

二次绕组额定线电流为

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 6.3} = 458.2(\text{A})$$

(2) 一次绕组为星形连接,一次侧额定相电压为(下标 ϕ 表示相值,下同)

$$U_{1N\phi} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5.774(\text{kV})$$

一次绕组额定相电流

$$I_{1N\phi} = I_{1N} = 288.7 \text{ A}$$

二次绕组为三角形连接,二次侧额定相电压

$$U_{2N\phi} = U_{2N} = 6.3 \text{ kV}$$

二次绕组额定相电流

$$I_{2N\phi} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{458.2}{\sqrt{3}} = 264.5(\text{A})$$

1.4 习题补充

1-1 电力变压器的主要用途有哪些?为什么电力系统中变压器的安装容量比发电机的安装容量大?

答 电力变压器按它的用途主要有:(1)升压变压器;(2)降压变压器;(3)配电变压器;(4)联络变压器;(5)厂用电变压器。因为发电机发出的电能要经过变压器升压、降压和配电后才传送到用户,所以变压器安装容量是发电机安装容量的 6~8 倍。

1-2 变压器原、副方的额定电压的含义是什么?

答 变压器一次额定电压 U_{1N} 是指规定加到一次侧的电压,二次额定电压 U_{2N} 是指变压器一次侧加额定电压、二次侧空载时的端电压。

1-3 一台三相变压器,额定电压 $U_{1N}/U_{2N}=10/3.15\text{ kV}$,额定电流 $I_{1N}/I_{2N}=57.74/183.3\text{ A}$,求该变压器的额定容量。

解 额定容量

$$S_N = \sqrt{3}U_{1N}I_{1N} = \sqrt{3} \times 10 \times 57.74 = 1000(\text{kV} \cdot \text{A})$$

或

$$S_N = \sqrt{3}U_{2N}I_{2N} = \sqrt{3} \times 3.15 \times 183.3 = 1000(\text{kV} \cdot \text{A})$$

提示:变压器的一、二次额定容量相等。三相变压器的额定容量 S_N 是指三相总容量。三相变压器的额定电压、额定电流均是指线值。

1-4 有一台 D-50/10 单相变压器, $S_N=50\text{ kV} \cdot \text{A}$, $U_{1N}/U_{2N}=10\,500/230\text{ V}$,试求变压器原、副线圈的额定电流?

解 一次绕组的额定电流

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{50 \times 10^3}{10\,500} = 4.76(\text{A})$$

二次绕组的额定电流

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{50 \times 10^3}{230} = 217.39(\text{A})$$

1-5 一台三相降压变压器的额定容量 $S_N=3200\text{ kV} \cdot \text{A}$,额定电压 $U_{1N}/U_{2N}=35/10.5\text{ kV}$,一、二次绕组分别为星形、三角形连接,求:(1)该变压器一、二次侧的额定线电压、额定相电压以及额定线电流、额定相电流;(2)若负载的功率因数为 0.85(滞后),则该变压器额定运行时能带多少有功负载,发出的无功功率又是多少(忽略负载运行时的二次电压的变化)?

解 (1) 一次侧的额定线电压就是一次额定电压,即 $U_{1N}=35\text{ kV}$ 。

由于一次绕组为星形连接,因此一次侧的额定相电压为

$$U_{1N\phi} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{35}{\sqrt{3}} = 20.21(\text{kV})$$

一次侧的额定线电流和相电流为

$$I_{1N} = I_{1N\phi} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{3200}{\sqrt{3} \times 35} = 52.79(\text{A})$$

二次侧的额定线电压就是二次额定电压,即 $U_{2N}=10.5\text{ kV}$ 。

由于二次绕组为三角形连接,因此二次侧额定相电压 $U_{2N\phi}=U_{2N}=10.5\text{ kV}$ 。二次侧的额定线电流为

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{3200}{\sqrt{3} \times 10.5} = 176(\text{A})$$

二次侧额定相电流为

$$I_{2N\phi} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{176}{\sqrt{3}} = 101.6(\text{A})$$

(2) 若负载的功率因数为 $\cos \varphi = 0.85$, 不计负载运行时二次电压的变化, 则额定运行时变压器发出的有功功率为

$$P_N = S_N \cos \varphi = 3200 \times 0.85 = 2720 (\text{kW})$$

发出的无功功率为

$$Q_N = S_N \sin \varphi = 3200 \times 0.5268 = 1686 (\text{kvar})$$

提示: 注意三相变压器在不同连接方式下的相电压与线电压关系、相电流与线电流关系, 以及它们的额定值与额定容量的关系。

1-6 有一台 SSP-125 000/220 三相电力变压器, YN, d 接线, $U_{1N}/U_{2N} = 220/10.5 \text{ kV}$, 求:

(1) 变压器额定电压和额定电流;

(2) 变压器原、副线圈的额定相电流和额定相电流。

解 (1) 一、二次侧额定电压

$$U_{1N} = 220 \text{ kV}, \quad U_{2N} = 10.5 \text{ kV}$$

一次侧额定电流(线电流)

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{125\,000}{\sqrt{3} \times 220} = 328.04 (\text{A})$$

二次侧额定电流(线电流)

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{125\,000}{\sqrt{3} \times 230} = 6873.22 (\text{A})$$

(2) 由于采用 YN, d 接线, 故

一次绕组的额定相电压

$$U_{1N\phi} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127.02 (\text{kV})$$

一次绕组的额定相电流

$$I_{1N\phi} = I_{1N} = 328.04 (\text{A})$$

二次绕组的额定相电压

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

二次绕组的额定相电流

$$I_{2N\phi} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{6873.22}{\sqrt{3}} = 3968.26 (\text{A})$$

2.1 内容提要

2.1.1 基本要求

1. 熟知变压器空载运行时内部各电磁量的关系；
2. 熟知变压器空载运行时励磁电流的概念，掌握空载运行时的变比、电压平衡方程、等值电路和相量图；
3. 熟知变压器负载运行时内部各电磁量的关系；
4. 掌握负载运行时原副边的折合算法；
5. 熟练掌握变压器负载运行时的电压平衡方程、等值电路和相量图；
6. 熟练掌握变压器的空载和短路实验，以及运用其实验结果求取变压器等值电路参数的方法；
7. 熟知变压器运行时的特性指标，熟练掌握变压器的电压变化率和效率这两个特性指标的计算方法。

2.1.2 掌握要点

1. 变压器的基本工作原理

变压器是将一个数值的交流电压变换为另一数值的交流电压的交流电能变换装置，以电磁场作为原副边绕组间的能量传递媒介，基本工作原理是电磁感应定律。

2. 变压器的主磁通

变压器的磁路中存在着主磁通，其主要功能是实现原副边绕组之间的能量传递。

变压器的主磁通同时交链原副边绕组，在原副边绕组中产生感应电动势 E_1 和 E_2 ：

$$E_1 = 4.44fN_1\Phi_m \quad (2-1)$$

$$E_2 = 4.44fN_2\Phi_m \quad (2-2)$$

写成相量形式则：

$$\dot{E}_1 = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N_1 \dot{\Phi}_m = -j4.44fN_1 \dot{\Phi}_m$$

$$\dot{E}_2 = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N_2 \dot{\Phi}_m = -j4.44fN_2 \dot{\Phi}_m$$

由于原副边绕组的匝数不同,因而在传递能量的同时实现了电压的变换。其原理如下:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 f N_1 \Phi_m}{4.44 f N_2 \Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

式中 k 为电压变比,决定于原副绕组匝数之比。

变压器空载运行时,空载电流很小,一般为额定电流的 5% 左右,由此引起的漏阻抗压降很小。若忽略由空载电流所引起的电阻压降和漏磁电动势,则有

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 \quad (2-3)$$

因而变比又可写成如下形式:

$$k = \frac{U_1}{U_{20}}$$

即变压器的变比可理解为变压器原边电压与副边空载时的端点电压之比。换言之,只要 $N_1 \neq N_2$,便有, $U_1 \neq U_2$,从而可达到了改变电压之目的。

3. 变压器的漏磁通

变压器的磁路中还存在着漏磁通,漏磁通不参与原副边绕组之间的能量的传递,但影响变压器的性能。分别与原边绕组或副边绕组交链,在变压器内部产生电压降,在电机学理论中用漏电抗来表征其作用。下面以原边为例推导如下:

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N_1 \dot{\Phi}_{1\sigma m} = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \omega \dot{\Psi}_{1\sigma} = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \omega L_{1\sigma} \dot{I}_0 = -j \dot{I}_0 X_{1\sigma}$$

式中 $X_{1\sigma}$ 为原边绕组的漏电抗, $X_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma}$ 。

4. 变压器的原副边绕组中的电动势平衡

在变压器的原副边绕组中均存在着各自的电动势平衡关系:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_1 + jX_{1\sigma})$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{I}_2 (R_2 + jX_{2\sigma})$$

5. 原副边绕组之间的磁动势平衡

在原副边两绕组之间存在着磁动势平衡关系。当副边带上负载后,其绕组中便有电流流过。由该电流产生的副边绕组的磁动势 $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$ 此时也同时作用在铁芯磁路上。

据式(2-3)可得

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

由上式可见,若端电压一定,则变压器运行时不管负载如何变化,其磁通 Φ_m 是基本不变的。

这也就是说,此时原副边两绕组的磁动势之和仍然等于空载时的磁动势 $\dot{I}_m N_1$,并基本保持不变,即

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_m N_1 \quad (2-4)$$

根据变压器运行时的相量图可知, $\dot{I}_1$ 与 $\dot{I}_2$ 的相位几乎是相反的,因此 $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2$ 要基本维持一个定值, $\dot{I}_1$ 就必然随着 $\dot{I}_2$ 的变化而变化。也就是说,当变压器副边的负载增大也即 I_2 增大时, I_1 就必然随之增大,因为只有这样才能够维持磁动势的平衡,这就是变压器运

行时的磁动势平衡关系。式(2-4)称为磁动势平衡方程式。

6. 磁动势平衡的物理意义

磁动势平衡的物理意义是：由于要维持磁动势平衡，当变压器副边的负载发生变化时，变压器原边的电流必然会跟随副边电流的变化而变化。这就是为什么变压器的原副边之间根本就没有电的联系，而当副边电流发生变化时，原边电流也会跟随变化的原因所在。正是原边电流跟随着副边电流变化，比如说副边的负载增大，原边电流也就跟随着副边电流的增大而增大，从而原边从电网的输入功率增加，从而为副边提供更大的功率，以维持副边增大的输出。如若没有变压器原副边之间的磁动势平衡，其原边是无法知晓副边输出的变化的，也就无法相应地提供更大的输入，以维持原副边之间的功率平衡，保障变压器的正常运行，这就是磁动势平衡的意义所在。

7. 磁动势平衡的电流表达式

将式(2-4)除以 N_1 并移项可得磁动势平衡的电流表达式：

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m - \dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1} = \dot{I}_m + \dot{I}_{1L}$$

式中 $\dot{I}_{1L}$ 为原边电流的负载分量， $\dot{I}_{1L} = -\dot{I}_2 \frac{N_1}{N_2}$ 。

8. 电流表达式的物理意义

当变压器的副边有负载电流时，原边电流 $\dot{I}_1$ 中含有两个分量。其中， $\dot{I}_m$ 基本与空载时的一样，也是用以产生主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 。而负载分量 $\dot{I}_{1L}$ 即为副边带上负载后，原边电流 $\dot{I}_1$ 中出现的分量。

换言之，当副边绕组流过电流 $\dot{I}_2$ ，原边绕组便自动流入负载分量电流 $\dot{I}_{1L}$ ，以满足 $\dot{I}_{1L}N_1 + \dot{I}_2N_2 = 0$ 。这就是为什么变压器的原副边之间根本就没有电的联系，而当副边电流发生变化时，原边电流也会跟随变化的原因所在。

这就是磁动势平衡电流表达式的物理意义。

9. 励磁电流中的高次谐波

在铁芯饱和时，为了得到正弦变化的磁通，励磁电流中必须含有高次谐波，尤其是三次谐波。在变压器分析中常采用等效正弦波电流来等值替代，考虑铁耗后，等效励磁电流超前主磁通一个角度 α_{Fe} 。

10. 等效电路中的励磁阻抗 $R_m + jX_m$

实际的变压器中既有电路也有磁路，为了分析方便，因而引入了励磁阻抗 $R_m + jX_m$ （加上此前引出的漏电抗 $X_{1\sigma}$ 、 $X_{2\sigma}$ ）等参数，再将副边的各物理量折算至原边，便得到原副边具有电的直接联系的等效电路。

11. 变压器运行分析的三套工具

基本方程式、等效电路和相量图是分析变压器运行的三套分析工具。其中，基本方程式是变压器电磁关系的一组数学表达式，等效电路则是等效于实际变压器的一个电路图，相量图则是原副边的各物理量相位关系的示图。三者本质一致，作用相辅相成。在

实际应用时,定性分析时采用基本方程式,分析相位关系时采用相量图,定量计算时采用等效电路。

变压器的这三套工具在配套教材中已有详述,本书的绪论中也有总览,在此不再复述。

12. 根据空载和短路实验数据求取等效电路的参数

(1) 按图 2-1 所示的短路实验的接线图实验,根据所测取的实验数据便可求得变压器的阻抗、电阻和电抗:

$$|Z_k| = \frac{U_k}{I_k}, \quad R_k = \frac{p_k}{I_k^2}, \quad X_k = \sqrt{|Z_k|^2 - R_k^2}$$

由上式得出的电阻和阻抗还需计算折算到标准温度 75℃ 时的值:

$$R_{k(75^\circ\text{C})} = R_k \frac{234.5 + 75}{234.5 + \theta}, \quad |Z_{k(75^\circ\text{C})}| = \sqrt{R_{k(75^\circ\text{C})}^2 + X_k^2}$$

(2) 按图 2-2 所示的空载实验的接线图实验,根据所测取的实验数据便可求得变压器的变比、励磁阻抗、励磁电阻、励磁电抗:

$$k = \frac{U_0}{U_{20}}, \quad |Z_m| \approx \frac{U_0}{I_0}, \quad R_m \approx \frac{p_0}{I_0^2}, \quad X_m = \sqrt{|Z_m|^2 - R_m^2}$$

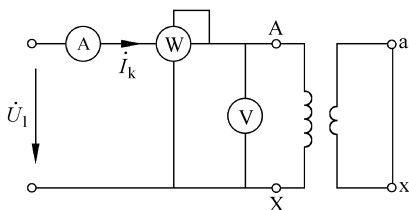


图 2-1 短路实验接线图

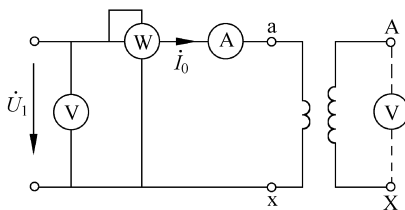


图 2-2 空载实验接线图

13. 变压器的主要性能指标

变压器的主要性能指标有两个:电压变化率 ΔU 和效率 η 。

(1) 必须熟练掌握的有关计算公式

① 电压变化率 $\Delta U\%$ 的计算公式

定义表达式:

$$\begin{aligned} \Delta U\% &= \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% = \frac{kU_{20} - kU_2}{kU_{2N}} \times 100\% \\ &= \frac{U_{1N} - U_2'}{U_{1N}} \times 100\% = (1 - U_2^*) \times 100\% \end{aligned}$$

参数表达式:

$$\Delta U\% = \beta(R_k^* \cos \varphi_2 + X_k^* \sin \varphi_2) \times 100\%$$

② 效率 η 及产生最大效率时的负载系数 β_m

$$\eta = \left[1 - \frac{\sum p}{p_2 + \sum p} \right] \times 100\% = \left(1 - \frac{p_0 + \beta^2 p_{kN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + p_0 + \beta^2 p_{kN}} \right) \times 100\%$$

$$\beta_m = \sqrt{\frac{p_0}{p_{kN}}}$$

(2) 必须牢固掌握的有关物理意义

- ① 变压器的电压变化率与所带负载的大小、短路阻抗和负载的功率因数有关。
- ② 变压器的效率与负载时的损耗有关。

2.2 疑难剖析

本章的疑难问题是变压器的正方向与楞次定律的关系。

人们对楞次定律是很清楚的,即由交变的电流产生交变磁通,该交变磁通在绕组中感应的电动势,应是阻碍原交变电流变化的。然而,如图 2-3 所示,在图中所假定的正方向中,原边所感应的电动势与电流是同方向的,那么岂不是助长其变化,而不是阻碍变化吗?

问题出在什么地方? 是正方向假定出了问题? 还是楞次定律出了问题?

其实,既不是正方向假定的问题,也不是楞次定律的问题,而是人们对楞次定律和正方向假定的理解上的问题。

要知道,交流电是随时随地变化的,分析其某一瞬时值的情形并不多见,更多的是分析其一般情况。此时就要用到方程式、等效电路或相量图等。而无论是列方程式、画相量图,还是用等效电路求解运行状态,都要先假定各物理量的正方向。

而楞次定律的运用,则只是判定某一瞬间感应电动势的方向的问题。

下面将证明其实以上两者是并不矛盾的。

上述曾提到,磁通的正方向根据电流方向按右手螺旋定则确定。其如图 2-3 所示,磁通在铁芯中按顺时针方向流动。

现假定电流和磁通按正弦规律变化,如图 2-4 所示。

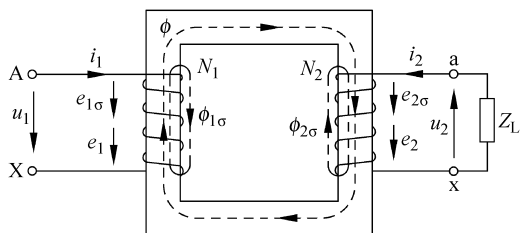


图 2-3 变压器原副边各物理量正方向的假定

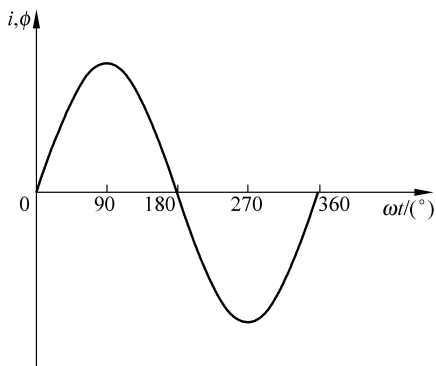


图 2-4 电流和磁通的波形

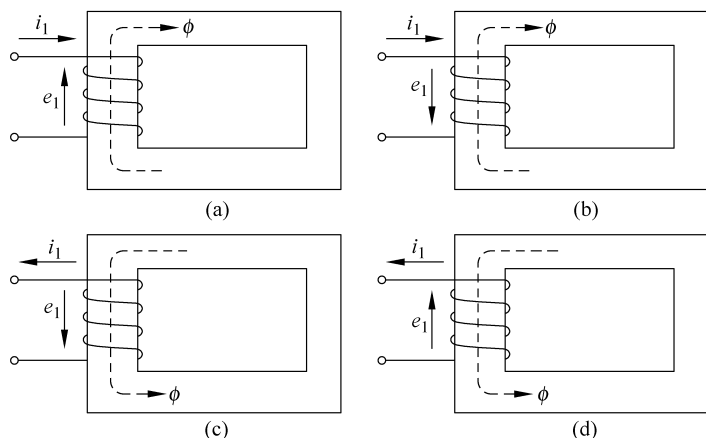
1. 当 $0 < \omega t < 90^\circ$ 时

如图 2-5(a)所示,此时 $i_1 > 0, \phi > 0$ 。因此,其在该时段内的实际方向与正方向相同。

又因为此时段内 $\frac{d\phi}{dt} > 0$, 根据

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2-5)$$

可知 $e_1 < 0$, 其实际方向与正方向相反, 箭头方向向上, 如图 2-5(a)所示。

图 2-5 各时段内 i, ϕ 和 e_1 的实际方向

(a) $0 < \omega t < 90^\circ$; (b) $90^\circ < \omega t < 180^\circ$; (c) $180^\circ < \omega t < 270^\circ$; (d) $270^\circ < \omega t < 360^\circ$

由于此时电流 i_1 是增大的, 从此时 e_1 和 i_1 的实际方向可以看出, e_1 与 i_1 方向相反, 即为阻止电流 i_1 变化(阻止其增大)。可见, 该结果与楞次定律一致。

2. 当 $90^\circ < \omega t < 180^\circ$ 时

如图 2-5(b) 所示, 此时 $i_1 > 0, \phi > 0$ 。因此, 其在该时段内的实际方向仍然与正方向相同。

但因为此时段内 $\frac{d\phi}{dt} < 0$, 根据式(2-5), 可知 $e_1 > 0$, 其实际方向与正方向相同, 箭头方向向下, 如图 2-5(b) 所示。

由于此时电流 i_1 是减小的, 从此时 e_1 和 i_1 的实际方向可以看出, e_1 与 i_1 方向相同, 即也为阻止电流 i 变化(阻止其减小)。可见, 该结果也与楞次定律一致。

3. 当 $180^\circ < \omega t < 270^\circ$ 时

如图 2-5(c) 所示, 此时 $i_1 < 0, \phi < 0$ 。因此, 其在该时段内的实际方向与正方向相反。

因为此时段内 $\frac{d\phi}{dt} < 0$, 根据式(2-5), 可知 $e_1 > 0$, 其实际方向与正方向相同, 箭头方向向下, 如图 2-5(c) 所示。

由于此时电流 i_1 是增大的, 从此时 e_1 和 i_1 的实际方向可以看出, e_1 与 i_1 方向相反, 即也为阻止电流 i_1 变化(阻止其增大)。可见, 该结果也与楞次定律一致。

4. 当 $270^\circ < \omega t < 360^\circ$ 时

如图 2-5(d) 所示, 此时 $i_1 < 0, \phi < 0$ 。因此, 其在该时段内的实际方向与正方向相反。

因为此时段内 $\frac{d\phi}{dt} > 0$, 根据式(2-5), 可知 $e_1 < 0$, 其实际方向与正方向相反, 箭头方向向上, 如图 2-5(d) 所示。

由于此时电流 i_1 是减小的, 从此时 e_1 和 i_1 的实际方向可以看出, e_1 与 i_1 方向相同, 即也为阻止电流 i_1 变化(阻止其减小)。可见, 该结果也与楞次定律一致。

综上所述,正方向的假定与楞次定律是并不矛盾的。

2.3 拾遗补缺

由于篇幅的关系,上述变压器正方向的假定惯例及过程在配套教材中并未具体说明。因此,作为拾遗补缺内容在此讲述。

应该明确的是交流电中的正方向的假定是任意的,各种假定方式并不影响最终的分析结果。但是实际上一般均有某种习惯,这就是所谓惯例。

现将变压器正方向假定的通行惯例(本书即按此惯例)说明如下(如图2-3所示)。

(1) 假定原边电压正方向。如图2-3所示,假定其由A指向X,即原边电压箭头方向自上指向下。

(2) 按电动机惯例假定原边电流的正方向。如图2-3所示,其由A流入,从X流出,其箭头方向在入端由A自左指向右。

(3) 根据电流方向按右手螺旋定则确定磁通的正方向,如图2-3所示,磁通在铁芯中按逆时针方向流动。

(4) 根据磁通方向依右手螺旋定则确定原副绕组中各自的感应电动势的正方向。如图2-3所示,原副边绕组中感应电动势的箭头方向均自上指向下。

(5) 按发电机惯例假定副边电流的正方向。如图2-3所示,其为由x点流出,a点流入。此时,负载上的电压当然是x点高a点低,其箭头方向自然是由下而上。

以上假定方法的特点,简单说就是:原边遵照电动机惯例,副边遵照发电机惯例。因为在人们的眼中,变压器的原边是挂在电网上的,对于电源来说其为负载一方,因此将其看成电动机是很自然的事情;而变压器的副边是接电负载的,其向负载输送电能,因此将其看成发电机再自然不过了。

2.4 习题解答

2-1 为什么要将变压器的磁通分成主磁通和漏磁通?它们之间有哪些主要区别?

答 变压器磁场情况很复杂,为便于分析,可把它分成等效的两部分磁通,其中一部分沿铁芯闭合,与原、副绕组交链,是变压器能量传递的媒介,称为主磁通;另一部分沿变压器油或空气等非铁磁材料闭合,仅与原绕组或副绕组交链,称为漏磁通。

由于铁磁材料磁导率远比空气大,漏磁通远远小于主磁通。铁磁材料存在饱和现象,主磁通与建立它的电流为非线性关系;漏磁通主要沿非铁磁材料闭合,是线性磁路,故漏磁通与建立它的电流为线性关系。主磁通交链原、副绕组,起传递能量的媒介作用;漏磁通的作用为在绕组电路中产生电压降,不传递能量,只起着电压降的作用。可见,主磁通和漏磁通,不仅在大小上相差很大,而且它们在性质和作用上也不同。

2-2 为了得到正弦感应电动势,当铁芯饱和、不饱和时,空载电流分别呈现什么波形?为什么?

答 在铁芯不饱和时,磁化特性(即励磁电流和主磁通的关系)是线性关系,故当感应电动势为正弦(即主磁通为正弦)时,空载电流也为正弦波形。

在铁芯饱和时,磁化特性为非线性,主磁通增加时,励磁电流增加更多。当感应电动势为正弦(即主磁通为正弦)时,空载电流为非正弦波形。在主磁通大的区域,空载电流更大,而呈尖顶波。

由于不考虑磁滞和涡流,所以空载励磁电流与主磁通在时间上同相,即与感应电动势相差 90° ,没有励磁功率损耗。

2-3 试述变压器励磁电抗和漏电抗的物理意义。它们分别对应什么磁通?对已经制成的变压器,它们是否是常数?当电源电压降到额定值的一半时,它们如何变化?这两个电抗大好还是小好,为什么?这两个电抗谁大谁小,为什么?

答 励磁电抗 X_m 对应于主磁通 Φ_m ,可以表征励磁电流 I_0 产生主磁通 Φ_m 、感应产生电动势 E_1 的能力。主磁通所走的磁路是闭合铁芯,其磁阻很小,而电抗与磁阻成反比,因此 X_m 的值很大。其所经过的铁芯磁路的磁导不是常数,因此 X_m 不是常数,其值与铁芯磁路的磁通密度大小有关。

一次绕组漏电抗 $X_{1\sigma}$ 与二次绕组漏电抗 $X_{2\sigma}$ 分别对应于一次绕组漏磁通和二次绕组漏磁通,漏磁通要经过空气构成闭合磁路,磁路的磁阻很大,因此 $X_{1\sigma}$ 和 $X_{2\sigma}$ 就很小。因为非铁磁材料的磁导率为常数,所以 $X_{1\sigma}$ 和 $X_{2\sigma}$ 均为常数。

当外施电压降低为额定电压的一半时,由于电压很低,主磁通很小,铁芯磁路不饱和,因此 X_m 值比额定运行时的大。漏磁通 $X_{1\sigma}$ 、 $X_{2\sigma}$ 要经过非铁磁材料而闭合,因为非铁磁材料的磁导率为常数,所以 $X_{1\sigma}$ 和 $X_{2\sigma}$ 的值不变。

2-4 变压器空载运行时,一次绕组加额定电压,这时一次绕组电阻 R_1 很小,为什么空载电流 I_0 不大?如将它接在同电压(仍为额定值)的直流电源上,会如何?

答 因为主磁通在一次绕组中产生的感应电动势基本上与一次绕组外加电压相平衡,即

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_0 X_1 + \dot{I}_0 R_1 = \dot{I}_0 Z_m + j\dot{I}_0 X_1 + \dot{I}_0 R_1$$

则 $\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_1}{Z_m + jX_1 + R_1}$ 因 $|Z_m| \gg X_1 > R_1$, 即 $|Z_m|$ 很大,所以一次电流并不大。

若接到同电压的直流电源上,则绕组中不能产生感应电动势,一次绕组电流等于 $\frac{U_1}{R_1}$, 由于一次绕组电阻 R_1 很小,因此一次电流将极大,会烧毁变压器。

2-5 一台 380/220 V 的单相变压器,如不慎将 380 V 加在二次绕组上,会产生什么现象?

答 若将低压边误接到 380 V 交流电源上,变压器绕组会烧坏。由于一般变压器在额定电压时,其工作点在磁化曲线拐弯处,此时的低压边电压比其额定电压高出许多,故主磁通也增加许多,磁路严重饱和,励磁电流猛增,会超过额定电流许多,发热严重而烧坏绕组绝缘。

2-6 变压器负载时,一、二次绕组中各有哪些电动势或电压降,产生的原因各是什么?

答 (1) 主磁通 Φ_m 在一、二次绕组中产生的相电动势 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$, $E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$, $E_2 = 4.44fN_2\Phi_m$ (N_1 、 N_2 分别为一、二次绕组每相匝数)。

(2) 一、二次绕组漏磁通在一、二次每相绕组中产生的漏磁电动势分别为 $\dot{E}_{1\sigma}$ 、 $\dot{E}_{2\sigma}$ 。

(3) 电流流过绕组, 绕组阻值分别为 R_1 、 R_2 , 产生的电阻压降为 $I_1 R_1$ 、 $I_2' R_2'$ 。

2-7 变压器铁芯中的磁动势, 在空载和负载时比较有哪些不同?

答 空载时的励磁磁动势只有一次侧磁动势 $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1$, 负载时的励磁磁动势是一次侧和二次侧的合成磁动势, 即 $\dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2$, 也就是 $\dot{I}_0 N_1 = \dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2$ 。

2-8 试绘出变压器 T 形、近似和简化等效电路, 说明各参数意义。

答 (1) T 形等效电路

T 形等效电路如图 2-6 所示, R_m 称为励磁电阻, 是对应于铁损耗的等效电阻; X_m 称为励磁电抗, 是反映铁芯磁路性能的等效电抗; 一次绕组有电阻 R_1 , 二次绕组有电阻 R_2 ; 一、二次绕组漏电抗 $X_{1\sigma}$ 、 $X_{2\sigma}$ 分别和一、二次绕组的漏磁通相对应, $X_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma}$, $X_{2\sigma} = \omega L_{2\sigma}$ 。

(2) 近似等效电路

如图 2-7 所示, 将 R_1 、 R_2' 合并为一个电阻 $R_k = R_1 + R_2'$, 将 $X_{1\sigma}$ 、 $X_{2\sigma}'$ 合并为一个电抗 $X_k = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'$, 则 $Z_k = R_k + jX_k$, 即为近似等效电路。其中 R_k 、 X_k 和 Z_k 分别称为短路电阻、短路电抗和短路阻抗。

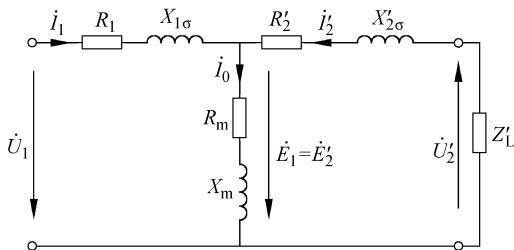


图 2-6 题 2-8 中的变压器 T 形等效电路

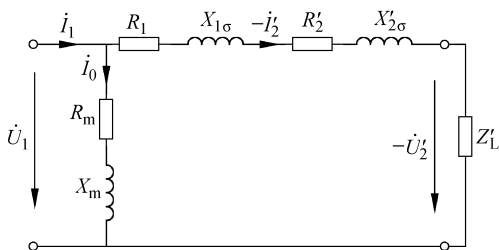


图 2-7 题 2-8 中的变压器的近似等效电路

(3) 简化等效电路

如果进一步略去励磁电流, 这时的等效电路称为简化等效电路, 如图 2-8 所示。用简化等效电路进行计算有较大误差, 常用于定性分析。

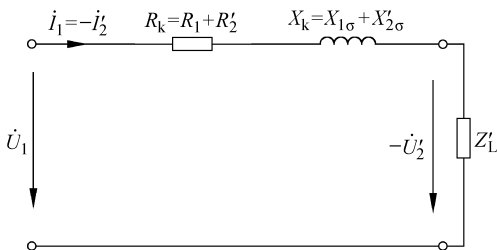


图 2-8 题 2-8 中的变压器的简化等效电路

2-9 变压器二次侧接电阻、电感和电容负载时, 从一次侧输入的无功功率有何不同, 为什么?

答 变压器二次侧带电感性、电阻性负载时, 从一次侧吸收的无功功率是电感性的。变压器运行时, 需要从电源吸收电感性的无功功率(即电流滞后电压 90° 的无功功率), 其中主要是产生铁芯磁路中主磁通所需的无功功率(励磁电抗 X_m 吸收的无功功率), 此外还有很小一部分是产生漏磁通所需的无功功率(漏电抗 $X_{\sigma 1}$ 和 $X_{\sigma 2}$ 吸收的无功功率)。

接电容负载时,分三种情况:(1)当变压器本身所需的感性无功功率与容性负载所需的容性无功功率相同时,变压器不从电网吸收无功功率;(2)若前者大于后者,变压器从电网吸收的无功功率为感性的;(3)若前者小于后者,变压器从电网吸收的无功功率为容性的。

2-10 为什么变压器的空载损耗可以近似看成铁损,短路损耗可以近似看成铜损耗?负载时变压器真正的铁损耗和铜损耗与空载损耗有无差别,为什么?

答 空载时,空载电流很小,绕组电阻又很小,所以铜损耗 $I_0^2 R_1$ 很小,故铜损耗可以忽略,空载损耗可以近似看成铁损耗。短路时,变压器所加电压很低,根据 $E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$ 可知, $\Phi_m = \frac{E_1}{4.44 f N_1}$, 因为 E_1 很小,磁通就很小,因此磁密 $B_m = \frac{\Phi_m}{S}$ 很低。再由铁损耗 $p_{Fe} \propto B_m^2 f^{1.3}$ 可知铁损耗很小(可以忽略),短路损耗可以近似看成铜损耗。

负载时,因为变压器电源电压不变, E_1 变化很小($E_1 \approx U_1$),主磁通几乎不变,磁密就几乎不变,铁损耗也就几乎不变,因此真正的铁损耗与空载损耗几乎无差别,是不变损耗。铜损耗与电流的平方成正比,因此负载时的铜损耗将随电流的变化而变化,是可变损耗,显然,负载时的铜损耗将因电流的不同而与短路损耗有差别。

2-11 一台单相变压器, $S_N = 20\,000 \text{ kV} \cdot \text{A}$, $U_{1N}/U_{2N} = \frac{220}{\sqrt{3}}/11 \text{ kV}$, $f_N = 50 \text{ Hz}$,线圈为铜线。空载及短路实验数据如表 2-1 所示(实验时温度为 15°C),试求:

表 2-1 题 2-11 变压器空载和短路实验数据表

实验类型	电压/V	电流/A	功率/kW	备 注
空载实验	11 000	45.4	47	在低压侧测量
短路实验	9240	157.5	129	在高压侧测量

(1) 折算到高压侧的 T 形等效电路中各参数的欧姆值及标么值 (假定 $R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2}$, $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{X_k}{2}$);

(2) 短路电压及各分量的标么值;

(3) 在额定负载下, $\cos \varphi_2 = 0.8 (\varphi_2 > 0)$ 和 $\cos \varphi_2 = 0.8 (\varphi_2 < 0)$ 时的电压变化率;

(4) 在额定负载下, $\cos \varphi_2 = 0.8 (\varphi_2 > 0)$ 时的效率;

(5) 当 $\cos \varphi_2 = 0.8 (\varphi_2 > 0)$ 时的最大效率。

解 (1) 低压侧励磁阻抗

$$Z_m = \frac{U_0}{I_0} = \frac{11 \times 10^3}{45.4} = 242.29 (\Omega)$$

低压侧励磁电阻

$$R_m = \frac{p_0}{I_0^2} = \frac{47 \times 10^3}{45.4^2} = 22.8 (\Omega)$$

低压侧励磁电抗

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} = \sqrt{242.29^2 - 22.8^2} = 241.21 (\Omega)$$

变比

$$K = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{\frac{220}{\sqrt{3}}}{11} = 11.547$$

折算到高压侧的励磁电阻

$$R'_m = K^2 R_m = 11.547^2 \times 22.8 = 3040(\Omega)$$

折算到高压侧的励磁电抗

$$X'_m = K^2 X_m = 11.547^2 \times 241.21 = 32\,161.3(\Omega)$$

高压侧短路阻抗

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{9.24 \times 10^3}{157.5} = 58.67(\Omega)$$

高压侧短路电阻

$$R_k = \frac{P_k}{I_k^2} = \frac{129 \times 10^3}{157.5^2} = 5.2(\Omega)$$

高压侧短路电抗

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{58.67^2 - 5.2^2} = 58.44(\Omega)$$

折算到 75℃ 时短路电阻

$$R_{k(75^\circ\text{C})} = \frac{235 + 75}{235 + 15} R_k = \frac{235 + 75}{235 + 15} \times 5.2 = 6.448(\Omega)$$

折算到 75℃ 时短路阻抗

$$Z_{k(75^\circ\text{C})} = \sqrt{R_{k(75^\circ\text{C})}^2 + X_k^2} = \sqrt{6.448^2 + 58.44^2} = 58.8(\Omega)$$

T 形等效电路原副边的电阻

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_{k(75^\circ\text{C})}}{2} = \frac{6.448}{2} = 3.224(\Omega)$$

T 形等效电路原副边的电抗

$$X_1 = X'_2 = \frac{X_k}{2} = \frac{58.44}{2} = 29.22(\Omega)$$

基准阻抗

$$Z_{1N} = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} = \frac{U_{1N}^2}{S_N} = \frac{\left(\frac{220 \times 10^3}{\sqrt{3}}\right)^2}{20\,000 \times 10^3} = \frac{2420}{3}(\Omega)$$

励磁电阻标么值

$$R_m^* = \frac{R'_m}{Z_{1N}} = \frac{3040}{\frac{2420}{3}} = 3.77$$

励磁电抗标么值

$$X_m^* = \frac{R'_m}{Z_{1N}} = \frac{32\,161.3}{\frac{2420}{3}} = 39.87$$

短路电阻标么值

$$R_{k(75^\circ\text{C})}^* = \frac{R_{k(75^\circ\text{C})}}{Z_{1N}} = \frac{6.448}{\frac{2420}{3}} = 0.008$$

短路电抗标么值

$$X_k^* = \frac{X_k}{Z_{1N}} = \frac{58.44}{\frac{2420}{3}} = 0.0724$$

T形等效电路原副边电阻的标么值

$$R_1^* = R_2^* = \frac{R_{k(75^\circ\text{C})}}{2} = \frac{0.008}{2} = 0.004$$

T形等效电路原副边电抗的标么值

$$X_1^* = X_2^* = \frac{X_k^*}{2} = \frac{0.0724}{2} = 0.0362$$

(2) 短路电压的标么值

$$u_k^* = \frac{I_{1N} Z_{k(75^\circ\text{C})}}{U_{1N}} = \frac{Z_{k(75^\circ\text{C})}}{Z_{1N}} = Z_{k(75^\circ\text{C})}^* = \frac{58.8}{\frac{2420}{3}} = 0.0729$$

短路电压有功分量的标么值

$$u_{ka}^* = \frac{I_{1N} R_{k(75^\circ\text{C})}}{U_{1N}} = \frac{R_{k(75^\circ\text{C})}}{Z_{1N}} = R_{k(75^\circ\text{C})}^* = 0.008$$

短路电压无功分量的标么值

$$u_{kr}^* = \frac{I_{1N} X_k}{U_{1N}} = \frac{X_k}{Z_{1N}} = X_k^* = 0.0724$$

(3) 额定负载时, 负载系数 $\beta=1$

① $\cos \varphi_2 = 0.8 (\varphi_2 > 0)$ 时, $\sin \varphi_2 = 0.6$ 。电压变化率和二次端电压分别为

$$\begin{aligned} \Delta u &= \beta(r_k^* \cos \varphi_2 + x_k^* \sin \varphi_2) = 1 \times (0.008 \times 0.8 + 0.0724 \times 0.6) \\ &= 0.04984 \end{aligned}$$

$$U_2 = (1 - \Delta u) U_{2N} = (1 - 0.04984) \times 11 = 10.452 (\text{kV})$$

② $\cos \varphi_2 = 0.8 (\varphi_2 < 0)$ 时, $\sin \varphi_2 = -0.6$ 。电压变化率和二次端电压分别为

$$\begin{aligned} \Delta u &= \beta(r_k^* \cos \varphi_2 + x_k^* \sin \varphi_2) = 1 \times (0.008 \times 0.8 - 0.0724 \times 0.6) \\ &= -0.03704 \end{aligned}$$

$$U_2 = (1 - \Delta u) U_{2N} = (1 + 0.03704) \times 11 = 11.407 (\text{kV})$$

(4) 一次侧额定电流

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{20\,000 \times 10^3}{\frac{220 \times 10^3}{\sqrt{3}}} = 157.5 (\text{A})$$

满载时的铜损耗

$$P_{kN} = I_{1N}^2 r_{k(75^\circ\text{C})} = 157.5^2 \times 6.448 = 159.9507 (\text{kW})$$

效率

$$\begin{aligned} \eta &= \left(1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{kN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{kN}} \right) \times 100\% \\ &= \left(1 - \frac{47 + 1^2 \times 159.9507}{1 \times 20\,000 \times 0.8 + 47 + 1^2 \times 159.9507} \right) \times 100\% \\ &= 98.7\% \end{aligned}$$

(5) 最大效率时的负载系数

$$\beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{kN}}} = \sqrt{\frac{47}{159.9507}} = 0.542$$

最大效率为

$$\begin{aligned}\eta_{\max} &= \left(1 - \frac{2P_0}{\beta_m S_N \cos \varphi_2 + 2P_0}\right) \times 100\% \\ &= \left(1 - \frac{2 \times 47}{0.542 \times 20\,000 \times 0.8 + 2 \times 4.7}\right) \times 100\% \\ &= 99\%\end{aligned}$$

2.5 习题补充

2-1 变压器的参考方向和惯例的选择是不可改变的吗? 规定不同的参考方向对变压器各电磁量之间的实际关系有无影响? 教材中一次绕组电路采用电动机惯例, 是否意味着变压器的功率总是从一次侧流向二次侧? 应该如何判断其实际的功率流向?

答 变压器的参考方向和惯例的选择是可以改变的。采用不同的参考方向, 所得到的方程式将有所不同(其中有关量的符号会相应改变)。

规定不同的参考方向, 对变压器各电磁量之间的实际关系没有影响。

一次绕组电路采用电动机惯例, 并不意味着变压器的功率总是从一次侧流向二次侧。

有功功率的实际流向取决于在所规定的参考方向下功率的正负, 即应根据 $P = UI \cos \varphi$ 的正负来判断有功功率的实际流向。采用电动机惯例时, $P > 0$, 表示有功功率实际上是从一次侧输入的; $P < 0$, 则表明有功功率实际上是从一次侧输出的。若采用发电机惯例, 则结果正好相反。

同理, 根据 $Q = UI \sin \varphi$ 的正负, 可以判断无功功率的实际流向。采用电动机惯例时, $Q > 0$, 表示一次侧吸收电感性无功功率; $Q < 0$, 则表示一次侧发出电感性无功功率。若采用发电机惯例, 则结果正好相反。

2-2 变压器造好以后, 其铁芯中的主磁通与外加电压的大小、频率有何关系? 与励磁电流有何关系? 一台频率为 50 Hz、额定电压为 220/110 V 的变压器, 如果把一次绕组接到 50 Hz、380 V 或 110 V 电源上, 主磁通和励磁电流会如何变化? 如果把一次绕组接到 220 V、60 Hz 交流电源和直流电源上, 主磁通和励磁电流又将如何变化? 以上各种情况下的二次空载电压是多少?

答 (1) 主磁通 Φ_m 与外加相电压 U_1 、频率 f 的关系是

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m, \quad \Phi_m \approx \frac{U_1}{4.44 f N_1}$$

(2) 根据磁路欧姆定律, 磁动势 = 磁通 $\times$ 磁阻, 可得励磁电流和磁通关系为

$$\sqrt{2} N_1 I_{10} = \Phi_m R_m$$

其中, I_{10} 为一次绕组中励磁电流有效值, N_1 为一次绕组的匝数, Φ_m 为主磁通最大值, R_m 为主磁通所经磁路的磁阻(经闭合铁芯时, $R_m = \frac{l}{\mu_{Fe} S}$, 其中, l 为铁芯磁路长度, S 为铁芯的截面积, μ_{Fe} 为铁芯的磁导率), 表示 Φ_m 与 I_{10} 关系的曲线就是磁化特性曲线, 它呈饱和特性。

(3) 如果将 220 V 绕组接到 380 V 电源上,主磁通也将增到原来的 $\frac{380}{220}$ 倍;如接到 110 V 电源上,则主磁通为原来的 $1/2$ 。如果磁阻不变,则励磁电流与主磁通成正比。但由于铁芯磁路有饱和现象,接到 380 V 电源上,磁阻大幅地增加,所以此时励磁电流与接到 220 V 电源上的励磁电流的比值要比 $380/220$ 大很多。此时铁损耗和铜损耗都很大,时间久了有可能烧毁变压器。一般变压器额定电压都设计在磁化特性曲线的拐弯处,绕组电压低于其额定电压时,磁路都可看作是线性的,因此接到 110 V 电源时的励磁电流为 220 V 电源上励磁电流的 $1/2$ 。

(4) 磁通与频率成反比,所以接到 220 V、60 Hz 电源上时,主磁通将为接至 50 Hz 电源时的 $5/6$,其励磁电流也为原来的 $5/6$ 。但接到直流电源上的情况与接到交流电流上有本质的不同,此时绕组中不能产生感应电动势, $E_1 = 0$,一次电流将由欧姆定律决定,等于 U_1/R_1 ,其中 R_1 为一次绕组的电阻。由于 R_1 很小,因此电流将很大,足以烧毁变压器。

(5) 对于以上各种情况,除接到直流电源上的二次绕组空载电压为零外,其他的二次绕组的空载电压均为一次绕组电压的 $1/2$ 。

2-3 在变压器中,主磁通和原、副绕组漏磁通的作用有什么不同? 它们各是由什么磁动势产生的? 在等效电路中如何反映它们的作用?

答 (1) 主磁通在原、副绕组中均感应电动势,当副边接上负载时便有电功率向负载输出,故主磁通起传递能量的作用;而漏磁通不起传递能量的作用,仅起压降作用。

(2) 空载时有主磁通和一次侧绕组漏磁通,它们均由一次侧磁动势激励产生。负载时有主磁通、一次侧绕组漏磁通、二次侧绕组漏磁通,主磁通由一次绕组和二次绕组的合成磁动势即 $\bar{F}_0 = \bar{F}_1 + \bar{F}_2$ 共同产生,一次侧绕组漏磁通由一次绕组磁动势 $\bar{F}_1$ 激励产生,二次侧绕组漏磁通由二次绕组磁动势 $\bar{F}_2$ 激励产生。

(3) 在等效电路中,主磁通用励磁参数 X_m 来反映其作用,一次侧漏磁通用漏电抗 $X_{1\sigma}$ 来反映其作用,而二次侧漏磁通用漏电抗 $X_{2\sigma}$ 来反映其作用。

2-4 变压器的电抗参数 X_m 、 X_1 、 X_2 各与什么磁通相对应? 说明这些参数的物理意义及区别,从而分析它们的数值在空载试验、短路试验和正常负载运行时是否相等。

答 励磁电抗 X_m 对应于主磁通,主磁通所走的磁路是闭合铁芯,其磁阻很小,而电抗磁阻成反比,因此 X_m 的值很大。此外,铁芯的磁导率不是一个常数,它随磁通密度的增加而变小。磁阻与磁导率成反比,所以励磁电抗和铁芯磁导率成正比。由于短路试验时电压低、主磁通小,而空载试验时加额定电压、主磁通大,所以短路试验时励磁电抗比空载试验时的励磁电抗大。正常负载运行时加额定电压,所以主磁通和空载试验时基本相同,即负载运行时的励磁电抗和空载试验时的基本相等。

一次绕组漏电抗 X_1 与二次绕组漏电抗 X_2 分别对应于一次绕组漏磁通和二次绕组漏磁通,漏磁通要走空气磁路而闭合,磁路的磁阻很大,因此 X_1 和 X_2 就很小。因为空气的磁导率为常数,所以 X_1 和 X_2 为常数,即在空载试验、短路试验及正常负载运行时,它们的数值都相等。

2-5 变压器空载运行时,为什么功率因数很低?

答 变压器空载运行时,原边电流就是励磁电流,由有功分量和无功分量组成。由于铁耗小,有功分量小,因而主要是建立磁场的无功分量。无功分量与原边电压 $\dot{U}_1$ 近似相差