

第 3 章

磁路与变压器

工程应用中的各种电动机、很多电气元件、电工测量仪表以及控制和保护装置都离不开铁芯线圈,它们存在着电与磁之间的相互作用和相互转化。本章主要介绍磁路的基本知识、基本物理量,介绍磁场的基本性质以及电与磁的相互联系。通过对交流铁芯线圈及变压器的介绍,使读者更好地理解电磁线圈的原理和工作形式。

问题的提出

图 3-1 所示为实训室中常用的电器。它们有什么共性的知识吗?你能说出它们的工作原理吗?



图 3-1 变压器实物图

任务目标

- (1) 利用磁路的基本性质和基本定律理解交流铁芯线圈电路的电磁关系。
- (2) 能够利用变压器的变压、变流及变阻抗性质正确地选择和使用变压器,并在生活和学习中积极发现那些应用了电和磁关系的器件。
- (3) 学会正确使用电流互感器、钳形表及调压器等变压器,掌握使用这些仪器的场合和注意事项。

3.1 磁路

3.1.1 磁路及其基本定律

1. 磁场的相关物理量

1) 磁感应强度 B

磁感应强度 B 是描述磁场中某点的磁场强弱和方向的物理量,其大小可用该点磁场

作用于垂直于磁场方向且通有 1A 电流的 1m 长导体上的力 F 来衡量,即

$$B = \frac{F}{l \cdot I} \quad (3-1)$$

磁感应强度的单位: 特[斯拉](T)或韦伯/米²(Wb/m²),两者的关系为 $1\text{T}=1\text{Wb/m}^2$ 。

磁感应强度 B 是个矢量,其方向可用右手螺旋定则来确定。

如果磁场内各点的磁感应强度大小相等、方向相同,则称为均匀磁场。

2) 磁通 Φ

在磁场中,磁感应强度 B 与垂直于磁场方向的面积 S 的乘积称为通过该面积的磁通 Φ ,即

$$\Phi = BS \quad \text{或} \quad B = \frac{\Phi}{S} \quad (3-2)$$

在国际单位制(SI)中,磁通的单位是韦[伯](Wb)。

3) 磁导率 μ

磁导率 μ 是用来表示物质导磁性能的物理量,单位是亨/米(H/m)。不同物质的磁导率不同,真空中的磁导率 μ_0 为一常数,即 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。

某材料的相对磁导率 μ_r 是该材料的磁导率与真空中的磁导率 μ_0 的比值,即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3-3)$$

根据磁导率的大小,可将物质分为磁性材料和非磁性材料两类。非磁性材料如银、铝、铜等,其 $\mu_r \approx 1$; 而磁性材料如钢、铁、钴、镍及其合金等,其 μ_r 值很大,且不是常数,随磁感应强度和温度的变化而变化。

4) 磁场强度 H

磁场强度 H 是磁场中某点的磁感应强度与磁导率的比值,也是个矢量,即

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (3-4)$$

在 SI 单位制中,磁场强度 H 的单位为安[培]/米(A/m)。

2. 磁性材料的磁性能

磁性材料是制造变压器、电动机及各种电气元件铁芯的主要材料,具有导磁性、饱和性和磁滞性等性能。

1) 高导磁性

磁性材料内部存在着许多磁性小区域——磁畴。在无外磁场时,材料内各磁畴无规则排列,磁场互相抵消,从宏观上显示不出磁性。当加有外磁场时,磁性材料内部的磁畴就顺着外磁场的方向旋转,随着外磁场的增强,磁畴就逐渐旋转到与外磁场相同的方向,产生一个与外磁场同方向的磁化磁场。这个过程叫作磁性物质的磁化。

非铁磁物质内部不存在磁畴结构,因此不会被磁化,其导磁能力低。

2) 磁饱和性

铁磁材料磁化所产生的磁场不会随着外磁场的增强而无限地增强,当外磁场增强到一定数值时,磁化磁场的磁感应强度几乎不再增加,达到饱和值,如图 3-2 所示的磁化曲线($B-H$)中的 C 点到 D 点的范围。

3) 磁滞性

所谓磁滞,即在外磁场作正负变化(线圈中通有交变电流)的反复磁化过程中,磁性材料内磁感应强度 B 的变化总是落后于外磁场的变化。磁性材料反复磁化后,可得到图 3-3 所示的磁滞回线。由图 3-3 可看出,当 $H=0$ 时, $B \neq 0$, 此时的 B 称为剩磁感应强度(B_r), 对应图 3-3 中的 b 、 e 点。

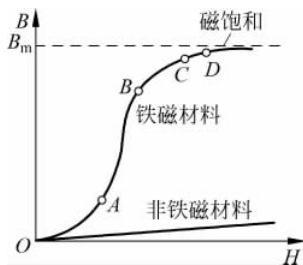


图 3-2 磁化曲线

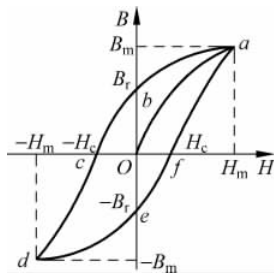


图 3-3 磁滞回线

磁滞和剩磁现象的发生是由于磁化过程的不可逆性,当外磁场强度降为零,各磁畴间的某种排列仍将保留下来,而表现为剩磁和磁滞现象。

若想去掉剩磁 B_r ,需加反向的磁场。使 $B_r=0$ 所需的 H 值称为矫顽磁力(H_c),对应图 3-3 中的 c 、 f 点。

磁性材料按其磁滞回线形状不同,可分成三类。

(1) 软磁材料,如纯铁、铸铁、硅钢、铁氧体等,其磁滞回线狭窄,剩磁和矫顽磁力均较小,常用来做成电动机、变压器的铁芯,也可做计算机的磁芯、磁鼓以及录音机的磁带、磁头。

(2) 硬磁材料,如碳钢、钨钢、钴钢及铁镍合金等,其磁滞回线较宽,剩磁和矫顽磁力都较大,适宜做永久磁铁。

(3) 矩磁材料,如镁锰铁氧体、铁镍合金等,磁滞回线接近矩形,在计算机和控制系统中可用作记忆元件、开关元件和逻辑元件。

3. 磁路的基本定律

1) 磁路

在电气元件或设备中,常常将线圈缠绕在一定形状的铁芯上以获得较强的磁场,如图 3-4 所示。因为铁芯是磁性材料,有良好的导磁性,能使绝大部分磁通经铁芯形成一个闭合通路,所以线圈通以较小的电流便可产生较强的磁场。这种人为用铁芯使磁通集中通过的路径称为磁路。

集中在一定路径上的磁通称为主磁通或工作磁通,如图 3-4 中的 Φ_0 。主磁通通常由铁芯(铁磁性材料)及空气隙组成。不通过铁芯,仅经过空气形成的闭合路径称为漏磁通,如图 3-4(a)中的 Φ_e 。在实际应用中,由于漏磁通很少,有时可忽略不计它的影响。

2) 磁路的分类

如图 3-4 所示,主磁通的磁路有纯铁芯磁路[见图 3-4(a)]和气隙磁路[见图 3-4(b)、图 3-4(c)、图 3-4(d)];磁路有分支磁路[见图 3-4(b)]和不分支磁路[见图 3-4(a)、图 3-4(c)、图 3-4(d)];磁路中的磁通可由线圈通过电流产生,见图 3-4(a)、图 3-4(b)、图 3-4(d),也可由永久磁铁产生,见图 3-4(b)。

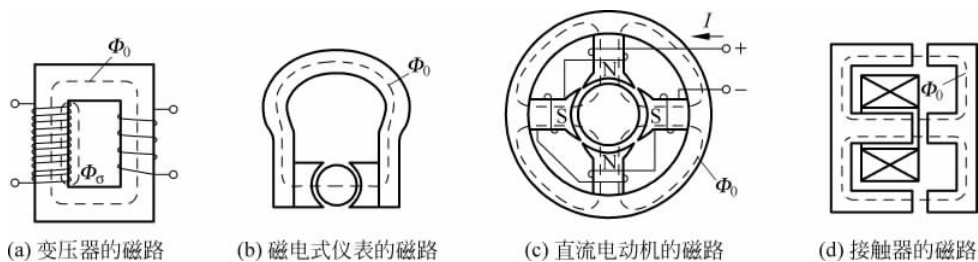


图 3-4 电气设备中的几种磁路

用来产生磁通的电流称为励磁电流,流过励磁电流的线圈称为励磁线圈。由直流电励磁的磁路称为直流磁路,由交流电流励磁的磁路称为交流磁路。

4. 磁路的欧姆定律

磁路的欧姆定律为

$$F = \Phi R_m \quad \text{或} \quad \Phi = \frac{F}{R_m} \tag{3-5}$$

式中： F ——磁路的磁动势,单位为安[培](A),且 $F = N \cdot I$ (N 为线圈绕组的匝数； I 为线圈中的电流)；

R_m ——磁路的磁阻,单位为亨⁻¹(1/H),且 $R_m = \frac{l}{\mu \cdot S}$ (μ 为磁导率； S 为磁路的横截面积； l 为磁路的平均长度)。

磁路的欧姆定律与电路的欧姆定律非常类似,其参数比较如表 3-1 所示。

表 3-1 磁路欧姆定律和电路欧姆定律的参数比较

磁 路			电 路		
名 称	符号表示	单 位	名 称	符号表示	单 位
磁通	Φ	Wb	电流	I	A
磁动势	$F = \Phi R_m$	A	电动势	E	V
磁阻	$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S}$	$\frac{1}{H}$	电阻	$R = \rho \frac{l}{S}$	Ω
磁路欧姆定律	$\Phi = \frac{F}{R_m}$		电路欧姆定律	$I = \frac{U}{R}$	

想一想：

- (1) 平面磨床装夹工件的夹具是电磁吸盘。加工完毕后,由于电磁吸盘有剩磁,工件仍被吸住,怎样才能将工件取下？
- (2) 磁性材料的磁导率为何不是常数？

(3) 磁性材料按其磁滞回线的形状不同,可分为几类?各有什么用途?

3.1.2 交流铁芯线圈电路的电磁关系

含有铁芯的线圈称为铁芯线圈,由于铁芯的磁导率 μ 不是常数,故铁芯线圈是一个非线性电路元件。

如图3-5(a)所示的交流铁芯线圈电路中,当在线圈中加正弦交流电压 u 时,线圈中流过电流 i ,则电流产生两部分磁通,即主磁通 Φ 和漏磁通 Φ_σ ,等效电路如图3-5(b)所示。

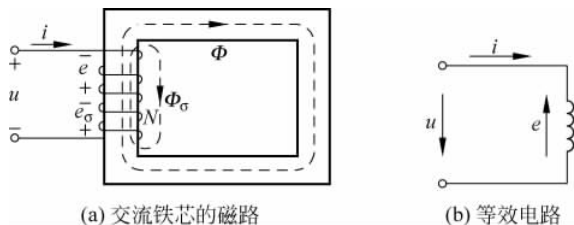


图 3-5 交流铁芯线圈电路

已知线圈匝数为 N ,损耗电阻为 R ,主磁通 Φ 和漏磁通 Φ_σ 产生感应电压分别是 e 和 e_σ 。根据KVL,铁芯线圈中的电压满足方程

$$u = iR + (-e) + (-e_\sigma) = iR + N \frac{d\Phi}{dt} + L_s \frac{di}{dt} \quad (3-6)$$

式中: L_s ——漏磁感。

由于铁芯线圈电阻的电压降 iR 和漏磁电动势 e_σ 很小,故可忽略,则式(3-6)可等效为

$$u = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3-7)$$

设 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$,则

$$u = N \frac{d\Phi}{dt} = \omega N \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f N \Phi_m \sin(\omega t + 90^\circ) = U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (3-8)$$

由式(3-8)可知,当线圈加上正弦电压时,铁芯中的磁通也是同频率的正弦交流量,相位滞后电压 90° 。式(3-8)中 $U_m = 2\pi f N \Phi_m$ 是电压的幅值,而其有效值则为

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N \Phi_m \quad (3-9)$$

式(3-9)表明,当外加电压 U 、电源频率 f 及线圈匝数 N 一定时,主磁通的幅值 Φ_m 保持恒定不变,与磁路性质无关。

此外,在交流铁芯线圈中,除了在线圈电阻上有功率损耗外,铁芯也有功率损耗。线圈电阻上损耗的功率 $I^2 R$ 称为铜损,用 ΔP_{Cu} 表示;铁芯的功率损耗称为铁损,它有磁滞损耗 ΔP_h 和涡流损耗 ΔP_e 两部分。交流铁芯线圈中的功率损耗用 ΔP 表示,有

$$\Delta P = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} = \Delta P_{Cu} + \Delta P_h + \Delta P_e \quad (3-10)$$

ΔP_h 是由磁性材料内部磁畴反复转向、磁畴间相互摩擦引起铁芯发热而造成的损耗。铁芯应选用软磁材料,以减小磁滞损耗。

ΔP_e 是在交变磁通作用下因铁芯内产生的感应电流在垂直于磁通的铁芯平面内形成的涡流而使铁芯发热引起的功率损耗。

通常情况下,铁芯采用表面涂有绝缘漆的硅钢片叠成,其磁导率高、电阻率大,片与片之间相互绝缘,把涡流限制在许多狭小的截面内,减少了涡流损耗。

想一想:

- (1) 试简述交流铁芯线圈中的电磁关系。
- (2) 举例说明涡流和磁滞的有害一面和它们的应用一面。

问题的解决

图 3-1 所示电器都是变压器,其基本工作原理是相同的,都是以电磁感应原理为基础的,具有变换交流电压、交流电流和阻抗的作用。图 3-1(a)和图 3-1(b)所示变压器的作用是将一种电压等级的交流电变换成另一种电压等级的交流电;图 3-1(c)所示钳形电流表是利用变压器的电流变换作用来测量大电流电路的电流。

3.2 变压器

3.2.1 常用变压器

变压器是一种常见的电气设备,它的基本作用是将一种电压等级的交流电能变换成另一种电压等级的交流电能。在电力系统和电子线路中,变压器应用广泛。它们的基本工作原理是相同的,即都是以电磁感应原理为基础的,具有变换交流电压、交流电流和阻抗的作用。

1. 变压器的结构

变压器由铁芯和绕在铁芯上的多个绕组两部分组成,如图 3-6 所示。

变压器铁芯的作用是构成磁路,通常用 0.35mm 或 0.5mm 厚的绝缘硅钢片叠成。常用的铁芯形式有心式[见图 3-6(a)]和壳式[见图 3-6(b)],目前一般采用心式铁芯。

绕组由漆包铜线绕制而成,是变压器的电路部分。一般变压器有两个绕组,与电源相连的绕组称为一次绕组(或称原绕组、初级绕组),与负载相连的绕组称为二次绕组(或称副绕组、次级绕组),匝数分别为 N_1 和 N_2 ,一次绕组、二次绕组套装在同一铁芯柱上。有时为了得到多组输出电压,二次侧就接成多组绕组。

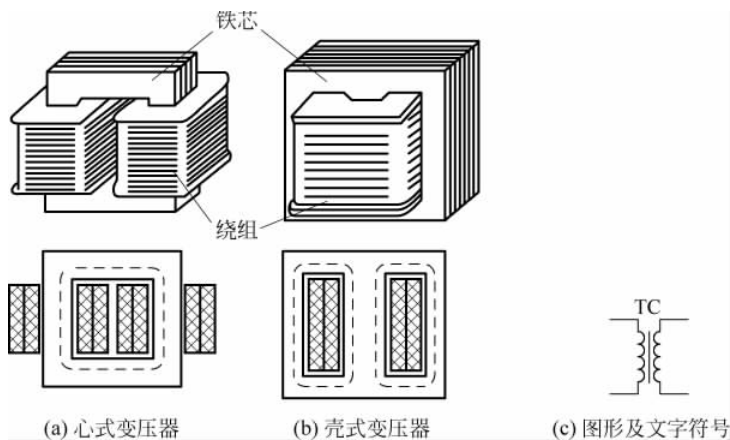


图 3-6 变压器结构示意图及图形文字符号

除了铁芯和绕组外,较大容量的变压器还有冷却系统、保护装置以及绝缘套管等。大容量变压器通常是三相变压器。

在电路中常用图 3-6(c)所示的图形和文字符号来表示变压器。

2. 变压器的工作原理

图 3-7 所示为变压器的工作原理图。

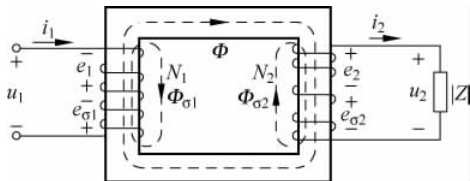


图 3-7 变压器的工作原理图

当一次绕组接上交流电压 u_1 时,一次绕组中便有电流 i_1 通过,一次绕组的磁动势 $N_1 i_1$ 产生的磁通 Φ_1 绝大部分通过铁芯而闭合,从而在二次绕组中产生感应电动势。如果二次绕组中接有负载,那么二次绕组中就有电流 i_2 通过,二次绕组的磁动势 $N_2 i_2$ 也产生磁通 Φ_2 ,其绝大部分也通过铁芯而闭合。因此,铁芯中的磁通是两者的合成,称为主磁通 Φ ,它交链一次绕组、二次绕组并在其中分别感应出电动势 e_1 和 e_2 。此外,一次绕组、二次绕组的磁动势还分别产生与本绕组相交链的漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$ 和 $\Phi_{\sigma 2}$,它们分别在各自绕组中感应出漏磁电动势 $e_{\sigma 1}$ 和 $e_{\sigma 2}$ 。变压器提供给负载的电压就是 e_2 和 $e_{\sigma 2}$ 的叠加量 u_2 。

3. 变压器的变压、变流、变阻抗作用

1) 电压变换

变压器的一次绕组接上交流电压,二次侧开路,这种运行状态称为变压器空载运行,如图 3-8 所示。此时,二次电流 $i_2 = 0$,一次电流(励磁电流) $i_1 = i_0$,也称为空载电流。

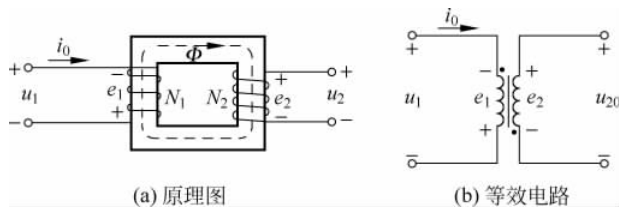


图 3-8 变压器的空载运行

根据前述变压器的原理可知,励磁电流 i_1 (一次电流)产生的主磁通 Φ 通过一次绕组也通过二次绕组,分别产生感应电压 u_1 、 u_{20} 。在忽略漏磁通和线圈电阻的情况下,根据式(3-8)可知,一次电压的有效值为

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (3-11)$$

同理,在 Φ 的作用下,二次产生的感应电压有效值为

$$U_{20} \approx E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (3-12)$$

由式(3-11)和式(3-12)可得

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44fN_1\Phi_m}{4.44fN_2\Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (3-13)$$

式(3-13)中, k 称为变压器的变比, 即一次绕组、二次绕组的匝数比。可见, 当电源电压 U_1 一定时, 只要改变匝数比, 就可得出不同的输出电压 U_2 。若 $k > 1$, 称为降压变压器; 而 $k < 1$, 称为升压变压器。

2) 电流变换

变压器的一次绕组接上电源, 二次绕组接有负载的运行状态称为负载运行状态, 如图 3-7 所示, 其电路模型如图 3-9 所示。

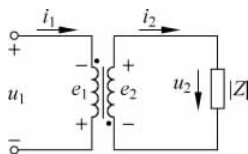


图 3-9 变压器的负载运行

前文已分析, $U_1 = 4.44fN_1\Phi_m$, 可见, 当电压 U_1 和电源频率 f 不变时, 主磁通的最大值 Φ_m 保持不变。就是说, 铁芯中的主磁通的最大值 Φ_m 在变压器空载或有负载时差不多是不变的。而空载时的 Φ_m 由一次绕组磁动势 N_1i_0 产生, 负载时的 Φ_m 由一次绕组、二次绕组磁动势 $N_1i_1 + N_2i_2$ 产生, 所以

$$N_1i_1 + N_2i_2 = N_1i_0 \quad (3-14)$$

变压器空载电流 i_0 是励磁用的, 由于铁芯磁导率高, 故空载电流很小, 只占一次绕组额定电流 I_N 的 3%~10%, 常可忽略。于是式(3-14)可写成

$$N_1i_1 \approx -N_2i_2 \quad (3-15)$$

则一次绕组、二次绕组的电流有效值关系为

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{k} \quad (3-16)$$

式(3-16)表明, 变压器一次侧绕组、二次侧绕组的电流有效值之比与它们的匝数成反比。

由于二次绕组的内阻抗很小, 故在二次侧带负载时的电压与空载时的电压基本相等, 根据式(3-13)和式(3-16)可得

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} = k = \frac{I_2}{I_1} \quad (3-17)$$

即

$$U_1I_1 = U_2I_2 \quad (3-18)$$

式(3-17)表明, 变压器一次侧绕组、二次侧绕组中电压高的一边电流小, 而电压低的一边电流大。而式(3-18)则表明, 变压器可以把一次侧绕组的能量通过 Φ_m 的联系传输到二次侧绕组中, 实现了能量的传输。

【例 3-1】 已知变压器 $N_1 = 1000$ 匝, $N_2 = 200$ 匝, $U_1 = 220\text{V}$, $I_2 = 10\text{A}$, 负载为纯电阻, 求变压器的二次电压 U_2 、一次电流 I_1 和输入功率 P_1 、输出功率 P_2 (忽略变压器的漏磁和损耗)。

解:

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1000}{200} = 5$$

$$U_2 = \frac{U_1}{k} = \frac{220}{5} = 44(\text{V})$$

$$I_1 = \frac{I_2}{k} = \frac{10}{5} = 2(\text{A})$$

输入功率

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 = 220 \times 2 \times 1 = 440 (\text{W})$$

输出功率

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = 44 \times 10 \times 1 = 440 (\text{W})$$

3) 阻抗变换

变压器除了变换电压和电流外,还可进行阻抗变换,以实现“匹配”。如图 3-10(a)所示,负载阻抗 Z_L 接在变压器二次侧,对电源来说,点画线框内部分可用另一个阻抗 Z'_L 来等效代替,如图 3-10(b)所示。所谓等效,就是两端输入的电压、电流和功率不变。两者的关系可通过下面计算得出:

$$|Z'_L| = \frac{U_1}{I_1} = \frac{\frac{N_1}{N_2} U_2}{\frac{N_2}{N_1} I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \frac{U_2}{I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 |Z_L|$$

即

$$|Z'_L| = k^2 |Z_L| \quad (3-19)$$

$|Z'_L|$ 又称为折算阻抗。式(3-19)表明,在忽略漏磁的情况下,只要改变匝数比,就可把负载阻抗变换为比较合适的数值,且负载性质不变,这种变换通常称为阻抗变换。

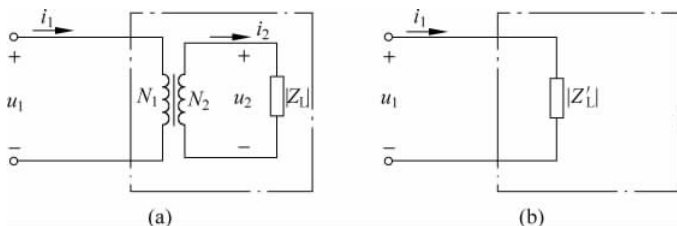


图 3-10 变压器的阻抗变换

【例 3-2】 有一信号源的电压为 1.5V , 内阻抗为 240Ω , 负载阻抗为 60Ω 。欲使负载获得最大功率, 必须在信号源和负载之间接一阻抗匹配变压器, 使变压器的输入阻抗等于信号源的内阻抗, 如图 3-11 所示。问变压器的电压比, 一次侧、二次侧的电流各为多少?

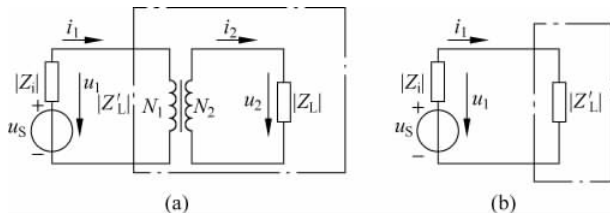


图 3-11 例 3-2 电路图

解:

$$|Z'_L| = k^2 |Z_L| = 240 (\Omega)$$

电压比

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{|Z'_L|}{|Z_L|}} = \sqrt{\frac{240}{60}} = 2$$

一次侧电流

$$I_1 = \frac{U_s}{|Z_i| + |Z'_L|} = \frac{1.5}{240 + 240} = 0.0031(\text{A}) = 3.1(\text{mA})$$

二次侧电流

$$I_2 = k I_1 = 2 \times 3.1 = 6.2(\text{mA})$$

4. 变压器的额定技术指标

1) 额定电压 U_{1N} 和 U_{2N}

原边额定电压(或称一次额定电压) U_{1N} 是指根据绝缘材料和允许发热所规定的应加在一次绕组上的正常电压的有效值。

副边额定电压(或称二次额定电压) U_{2N} 是指原边为额定电压 U_{1N} 时副边的空载电压的有效值。

三相变压器的 U_{1N} 和 U_{2N} 均指线电压。

2) 额定电流 I_{1N} 和 I_{2N}

原边额定电流 I_{1N} 、副边额定电流 I_{2N} 是指根据绝缘材料和允许发热所规定的一次绕组、二次绕组中允许长期通过的电流限额(有效值)。三相变压器的 I_{1N} 和 I_{2N} 均指线电流。

3) 额定容量 S_N

额定容量 S_N 是指变压器输出的额定视在功率,单位为伏安($\text{V} \cdot \text{A}$)或千伏安($\text{kV} \cdot \text{A}$)。

对单相变压器: $S_N = U_{2N} I_{2N} \approx U_{1N} I_{1N} (\text{V} \cdot \text{A})$ (3-20)

对三相变压器: $S_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} \approx \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} (\text{V} \cdot \text{A})$ (3-21)

4) 额定频率 f_N

额定频率 f_N 是指电源的工作频率。我国的工业频率是 50Hz。

5) 变压器的效率 η_N

变压器的效率 η_N 是指变压器的输出功率 P_{2N} 与对应的输入功率 P_{1N} 的比值,通常用小数或百分数表示。

前文对变压器的讨论均忽略了其各种损耗,而变压器是典型的交流铁芯线圈电路,其运行时原边和副边必然有铜损和铁损,所以实际上变压器并不是百分之百地传递电能。大型电力变压器的效率可达 99%,小型电力变压器的效率为 60%~90%。

想一想:

- (1) 变压器是怎样实现变压的? 为什么能变电压而不能变频率?
- (2) 变压器有哪些主要部件? 其功能是什么?
- (3) 变压器能否用来变换直流电压? 如何将变压器接到额定电压相同的直流电源上? 会有输出吗? 会产生什么后果?

3.2.2 特殊变压器

1. 自耦变压器

图 3-12(a)所示为自耦变压器(或称调压器)的电路示意图,它的二次绕组是一次绕组的一部分,故其一次绕组、二次绕组之间不仅有磁的耦合,还有电的联系,其一次绕组的、二次绕组的电压之比和电流之比为