变压器的工作原理

1. 变压器的原理图

单相变压器的原理图如图 1 所示。为了便于分析，将高压绕组和低压绕组分别放在两铁心柱上。接电源的绕组称为一次绕组（或原绕组、初级绕组）。接负载的绕组称为二次绕组(或副绕组、次级绕组)。一、二次绕组的匝数分别为 N_1 和 N_2。

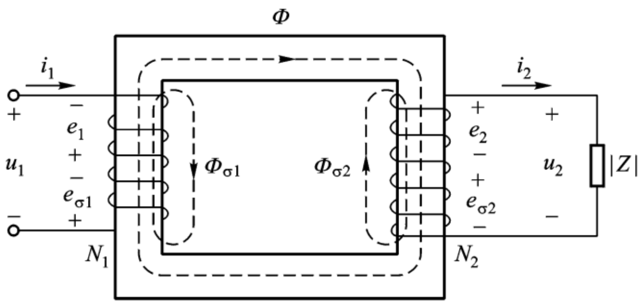

图 1　变压器的原理图

2. 电压变换

当一次绕组接上交流电源电压 u_1 时，一次绕组中便有电流 i_1 通过。如果变压器副绕组不接负载时，称变压器处于空载运行状态，二次绕组 $i_2=0$，一次绕组中的电流 $i_1=i_0$，称为空载电流。空载电流产生的磁势称空载磁势，空载磁势产生的磁通绝大部分通过铁芯闭合，称为主磁通，用 Φ 表示，极少部分磁通经过空气隙闭合，不与二次绕组相链，称为漏磁通，用 $\Phi_{\sigma1}$ 表示。

当主磁通穿过一次绕组时，就会在一次、二次绕组感生出电动势 e_1 和 e_2。漏磁通 $\Phi_{\sigma1}$ 仅交链一次绕组，只在一次绕组产生漏磁电动势 $e_{\sigma1}$。图 1 中标出了 u_1、i_0、Φ、$\Phi_{\sigma1}$ 及 e_1、e_2、$e_{\sigma1}$、u_{20} 的正方向，其中 i_0、Φ、$\Phi_{\sigma1}$、e_1、e_2 之间符合于右手螺旋关系。

根据基尔霍夫电压定律，可列出变压器空载时的一次侧电压方程式为

$$u_1+e_1+e_{\sigma1}=i_0R_1$$

$$u_1=R_1i_0+(-e_1)+(-e_{\sigma1})$$

如果电源电压 u_1 为正弦量，上式可用相量表示为

$$\dot{U}_1=R_1\dot{I}_0+(-\dot{E}_1)+(-\dot{E}_{\sigma1})$$

式中：$R_1\dot{I}_0$— —次绕组电阻上的压降；

$(-\dot{E}_{\sigma1})$— 漏磁通 $\Phi_{\sigma1}$ 在一次绕组中产生的漏磁压降。

对于实际的变压器，$R_1\dot{I}_0$ 及 $(-\dot{E}_{\sigma1})$ 都很小，忽略这两部分压降，则有

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$$

当 u_1 按正弦规律变化时，$\varPhi$ 也按正弦规律变化

$$\varPhi = \varPhi_\mathrm{m}\sin\omega t$$

主磁通 $\varPhi$ 分别在一次、二次绕组产生的感应电动势为

$$\begin{aligned} e_1 &= -N\frac{d\varPhi}{dt} = -N_1\frac{d}{dt}(\varPhi_\mathrm{m}\sin\omega t) = -\omega N_1\varPhi_\mathrm{m}\sin\omega t \\ &= 2\pi fN_1\varPhi_\mathrm{m}\sin(\omega t-90^\circ) = E_\mathrm{m1}\sin(\omega t-90^\circ) \\ e_2 &= -N_2\frac{d\varPhi}{dt} = 2\pi fN_2\varPhi_\mathrm{m}\sin(\omega t-90^\circ) \\ &= E_\mathrm{m}\sin(\omega t-90^\circ) \end{aligned}$$

可见主磁通产生的感应电动势 e_1 及 e_2 滞后于主磁通 $\varPhi 90^\circ$，它们的最大值为

$$E_\mathrm{m1} = 2\pi fN_1\varPhi_\mathrm{m}$$
$$E_\mathrm{m2} = 2\pi fN_2\varPhi_\mathrm{m}$$

有效值分别为

$$E_1 = \frac{E_\mathrm{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi fN_1\varPhi_\mathrm{m}}{\sqrt{2}} = 4.44fN_1\varPhi_\mathrm{m}$$

$$E_2 = \frac{E_\mathrm{m2}}{\sqrt{2}} == 4.44fN_2\varPhi_\mathrm{m}$$

在变压器空载时

$$I_2 = 0,\quad E_2 = U_{20}$$

由此可得一、二次的电压比为

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

式中，k 为变压器的变比，又称匝数比，可见，当电源电压一定时，改变匝数比，即可改变二次侧的输出电压。

3. 电流变换

当变压器二次侧接入负载 Z 以后，电动势 E_2 在二次绕组中产生电流 I_2，这时一次绕组的电流从空载电流 I_0 相应地增大到 I_1，二次电流 I_2 越大，一次电流 I_1 也越大，如图 2。

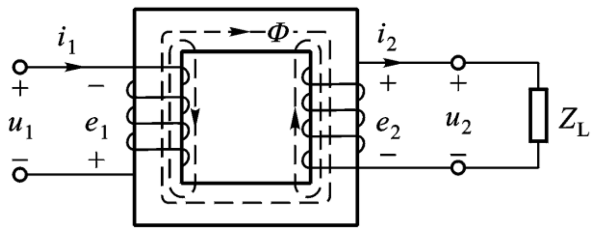

图 2　变压器的负载运行

从电磁关系的角度看，二次绕组中的电流 $\dot{I}_2$ 产生的磁通势 $\dot{I}_2N_2$，也要在铁芯中产生磁通。也就是说，这时变压器铁心中的主磁通将由一次绕组的磁通势和二次绕组的磁通势共同产生，显然 $\dot{I}_2N_2$ 的出现，将改变铁心中原有主磁通 Φ_m 的趋势。但是在一次绕组和二次绕组外加电压中不变的情况下，主磁通应基本上保持不变，因而一次绕组的电流必须由 $\dot{I}_0$ 变到 $\dot{I}_1$，使得一次绕组的磁通势由 $\dot{I}_0N_1$ 变成 $\dot{I}_1N_1$，以平衡二次绕组磁通势 $\dot{I}_2N_2$ 的影响，即变压器负载时的总磁通势应与变压器空载时的磁通势基本相等，才能维持主磁通基本不变。用公式表示为

$$\dot{I}_1N_1+\dot{I}_2N_2=\dot{I}_0N_1$$

这一关系式称为变压器磁势平衡方程式。

当变压器在额定负载下工作时，由于空载电流很小，可忽略不计，上式可写成

$$\dot{I}_1N_1+\dot{I}_2N_2\approx 0$$

或

$$\frac{I_1}{I_2}\approx\frac{N_2}{N_1}=\frac{1}{K}$$

可见，一、二次绕组电流之比近似与匝数成反比，说明变压器在变换电压时还变换电流。

4. 阻抗变换

在电子线路中，为了使负载获得较大的功率，常利用变压器进行阻抗变换，使信号源与负载之间进行匹配。当负载阻抗模为 $|Z|$，信号源要求的匹配阻抗模为 $|Z'|$ 时，利用图 3 所示电路可实现阻抗间的变换。

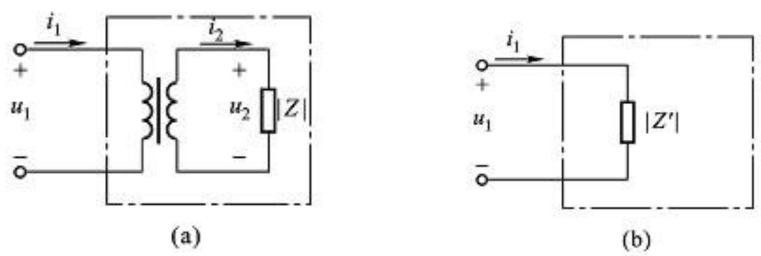

图 3　负载阻抗的等效变换

由电压电流变换知

$$\frac{U_1}{I_1}=\frac{\frac{N_1}{N_2}U_2}{\frac{N_2}{N_1}I_2}=(\frac{N_1}{N^2})^2\frac{U_2}{I_2}$$

由图 3 可知　$\frac{U_2}{I_2}=|Z'|$　　$\frac{U_2}{I_2}=Z$

代入可得　$|Z'|=(\frac{N_1}{N_2})^2|Z|=K^2|Z|$

上式表明，改变匝数比可获得所需的匹配阻抗值。

例 1　一单相变压器，高压绕组接 35kV 工频交流电源，低压绕组的开路电压为 6.6kV，铁心的截面积为 $1120\,\text{cm}^2$。若选取铁心中的磁感应强度 $B_m=1.5T$，试求该变压器的变比及高、低压绕组的匝数。

解：变压器的变比为　$K=\frac{U_1}{U_{20}}=\frac{35}{6.6}=5.3$

铁心中的磁通　$\Phi_m=B_mS=1.5\times1120\times10^{-4}=0.168\ \text{Wb}$

高压绕组的匝数　$N_1=\frac{U_1}{4.44f\Phi_m}=\frac{35\times10^3}{4.44\times50\times0.168}=938\text{匝}$

低压绕组的匝数　$N_2=\frac{N_1}{k}=\frac{938}{5.3}=177\text{匝}$

例 2　单相变压器额定容量为 50kVA，额定电压为 10000/230V。当负载阻抗 Z=0.824+j0.618Ω时，变压器正好满载。求变压器一次、二次绕组的额定电流及变压器对电源的等效阻抗。

解：副绕组的额定电流及变比 K

$$I_{2N}=\frac{S_{2N}}{U_{20}}=\frac{50\times10^3}{230}=217\ \text{A}$$

$$K=\frac{10000}{230}=43$$

原绕组的额定电流　$I_{1\text{N}}=I_{2\text{N}}\times\frac{1}{K}=217\times\frac{230}{10000}=5\text{A}$

负载阻抗　$|Z|=\sqrt{R_2+X_2^2}=\sqrt{0.824^2+0.618^2}=1.03\Omega$

等效阻抗　$|Z'|=K^2|Z|=(43)^2\times1.03=1947.23\Omega$