

变压器的负载运行

负载运行含义

指变压器原绕组接通电源，
付绕组接负载的工作状态。

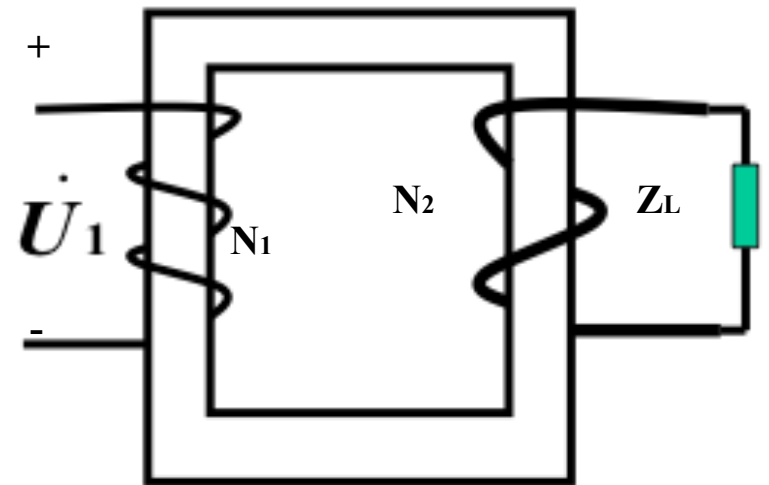
空载运行时原边电流

I_1 很小,付边 $I_2=0$,

负载运行时, I_1 随付边 I_2 增加而变大。

负载运行的物理过程及电磁关系

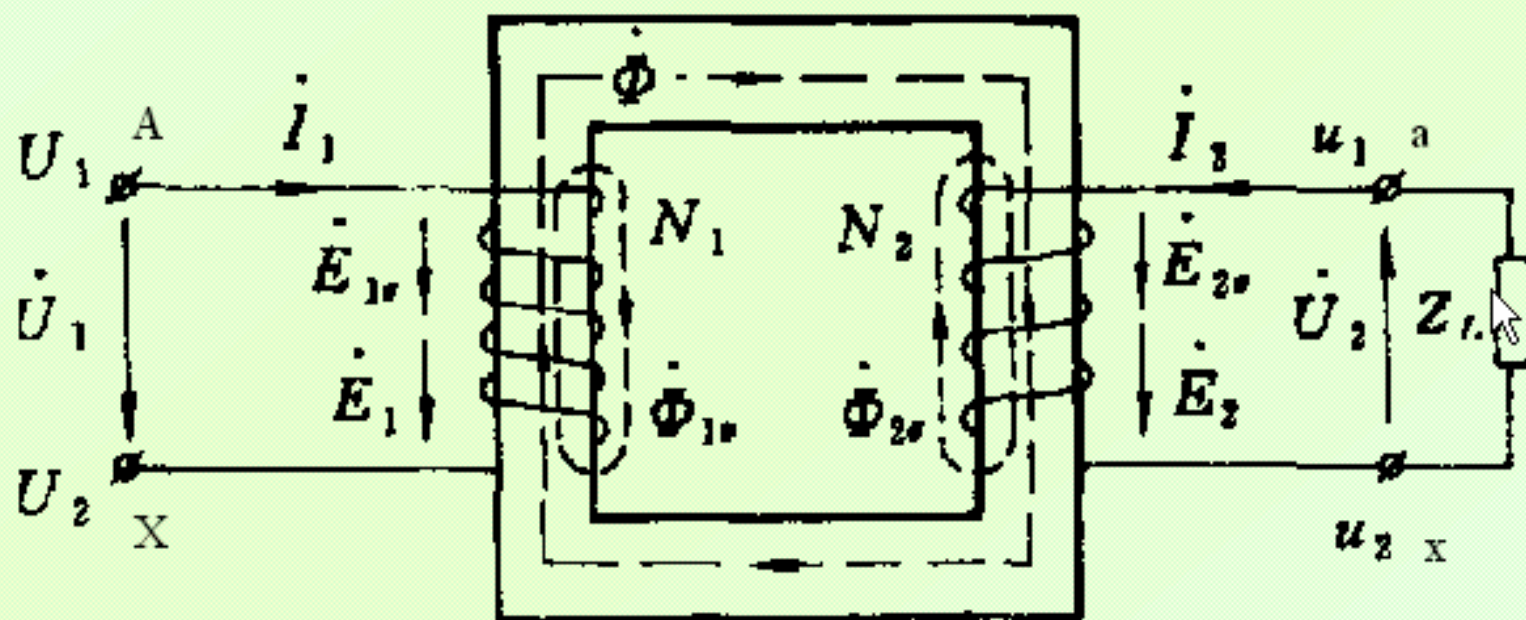
负载运行时,原付边都有电流。其物理过程及物理量的关系为:



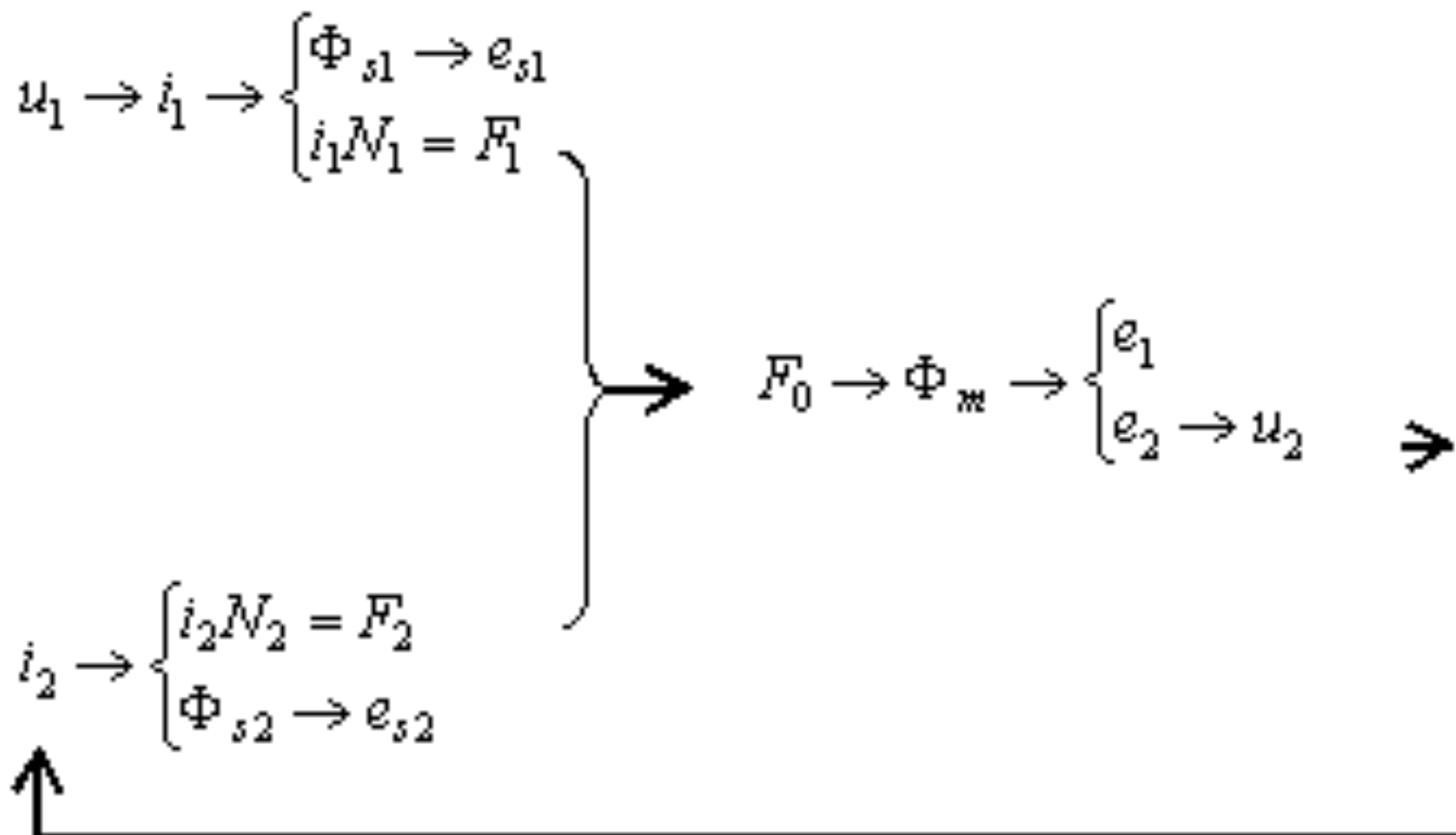


§ 3-3 单相变压器的负载运行

变压器原边接在电源上，副边接上负载的运行情况，称为负载运行。



变压器的负载运行电磁关系



磁动势平衡方程式

由于副边出现了负载电流 I_2 ，在副边要产生磁动势 $F_2=I_2N_2$ ，使主磁通发生变化，从而引起 E_1 、 E_2 的变化， E_1 的变化又使原边从空载电流 I_0 变化为负载电流 I_1 ，产生的磁动势为 $F_1=I_1N_1$ ，它一方面要建立主磁通 Φ_m ，另一方面要抵消 F_2 对主磁通的影响。

磁动势平衡方程式

由于负载时的 $I_1 z_1$ 很小，约占6% $U_1 N$ ，忽略 $I_1 z_1$ 时有 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ ，则可认为空载时主磁通与负载时主磁通近似相等，存在如下磁动势平衡方程式：

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_1 &= \dot{F}_0 + (-\dot{F}_2) \\ \dot{I}_1 N_1 &= \dot{I}_0 N_1 + (-\dot{I}_2 N_2) \end{aligned} \right\}$$

两边同除以 N_1 ，得

很小
可忽略

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2\right) = \dot{I}_0 + \left(-\frac{\dot{I}_2}{k}\right)$$

电流平衡方程式

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2\right) = \dot{I}_0 + \left(-\frac{\dot{I}_2}{k}\right)$$

负载时原边负载电流由两部分组成：一部分是励磁分量 \dot{I}_0 (exciting component)，用以产生负载时的主磁通，它基本不随负载变化；另一部分是负载分量 $-\dot{I}_2/k$ (load component)，用以抵消副边电流 \dot{I}_2 对主磁通产生的影响，它随负载变化而变化。

电流平衡方程式

由于 $I_0 \ll I_1$ ，忽略 I_0 时，原、副边电流关系为

$$I_1 \approx -\frac{I_2}{k}$$

或用有效值表示为

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k}$$

上式表明，负载运行时，原、副边电流与它们的匝数成反比，说明变压器在变换电压的同时，也能变换电流。

负载运行时的基本方程式

原边: $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1$

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0(r_m + jx_m) = \dot{I}_0 z_m$$

副边: $\dot{U}_2 = \overset{\text{感应电势}}{\dot{E}_2} - \dot{I}_2(r_2 + jx_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 z_2$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2(r_L + jx_L) = \dot{I}_2 z_L$$

负载运行时的基本方程式

原、副边：

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

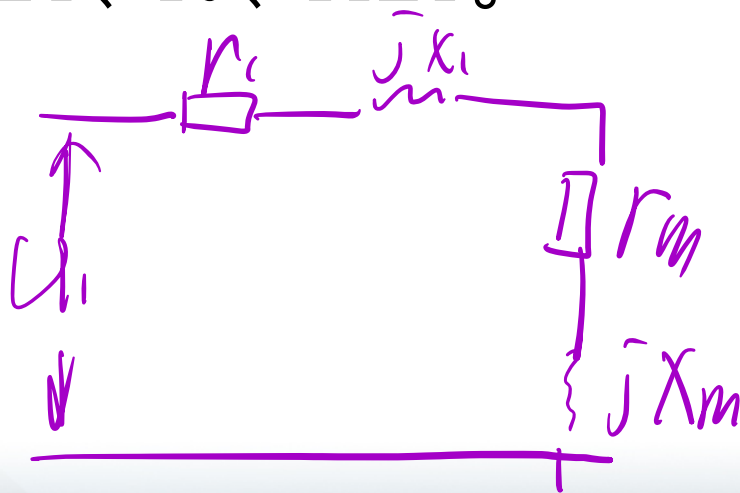
$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2/k)$$

式中 r_2 、 x_2 、 z_2 分别为副绕组的内阻、漏电抗和漏阻

抗， z_L 为负载阻抗。

【例2】

一台三相电力变压器，Yy接法， $S_N=100\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N}=6/0.4\text{kV}$ ，每相参数： $r_1=4.2\Omega$ ， $x_1=9\Omega$ ， $r_m=514\Omega$ ， $Z_m=5550\Omega$ 。求： I_{1N} 、 I_0 及每相的 Z_1 、 x_m U_1 、 E_1 、 I_0 、 $I_1 Z_1$ 。



$$r_1 \ll r_m$$
$$jX_1 \ll jX_m$$

【例2】

解：(1) $Z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2} = \sqrt{4.2^2 + 9^2} = 9.9\Omega$

$$x_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2} = \sqrt{5550^2 - 514^2} = 5526\Omega$$

(2) $U_1 = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{6 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 3464V$

$$E_1 = U_1 - I_1 Z_1 = 3464 - 9.62 \times 9.9 = 3369V$$

【例2】

$$(3) \quad I_0 = \frac{E_1}{Z_m} = \frac{3369}{5550} = 0.607 A$$

$$I_1 = I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6 \times 10^3} = 9.62 A$$

$$I_1 Z_1 = 9.62 \times 9.9 = 95.2 V$$

【例2】

从本例题的计算可推出： $r_1=4.2(\Omega) \ll r_m=514\Omega$ ；

$x_1=9\Omega \ll x_m=5526\Omega$ ； $Z_1=9.9\Omega \ll Z_m=5550\Omega$ ；

$r_m=514\Omega \ll x_m=5526\Omega$ ； $I_0/I_1N=6.3\%$ ， $\therefore I_1 \approx I_2$ ，因容

量 $S_N=100 \text{ kVA}$ 不大，故 I_0 占得较多，对大容量的变压器

空载电流所占比例会更小些； $I_1 Z_1 / U_1 = 2.7\%$ ，

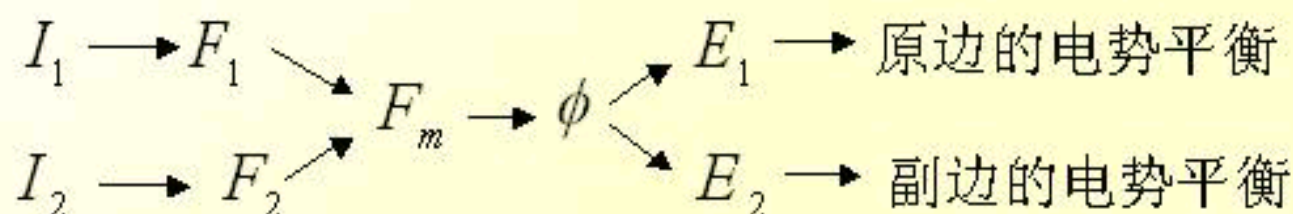
$\therefore U_1 \approx E_1$ 。

(正负一致)



单相变压器的负载运行

电路、磁路的工作情况：



忽略了漏阻抗压降, $\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1$ 主磁通 $\dot{\phi}_m$ 不变。从空载到负载, 初级绕组电流 \dot{I}_1 增加一个分量 \dot{I}_{1L} 以平衡次级绕组的作用,

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{1L}N_1 + \dot{I}_2N_2 &= 0 \\
 \dot{I}_{1L} &= -\dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1}
 \end{aligned}
 \quad \text{又} \quad
 \begin{aligned}
 \dot{U}_1 &\approx -\dot{E}_1 \\
 \dot{E}_2 &= \dot{E}_1 \frac{N_2}{N_1}
 \end{aligned}
 \quad \Rightarrow \quad
 \dot{U}_1 \dot{I}_{1L} = (-\dot{E}_1)(-\dot{I}_2) \frac{N_2}{N_1} = \dot{E}_2 \dot{I}_2$$

原边绕组从电网吸收的功率传递给副边绕组。副边绕组电流增加或减小的同时, 引起原边电流的增加或减小, 吸收的功率也增大或减小。



二 负载运行时的基本方程

1. 磁势平衡 $\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_m \rightarrow \dot{\phi}_m$

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{F}_m = \dot{I}_m N_1 \quad \text{Im 是激磁电流, 固定不变的量。}$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + \left(-\dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1}\right) = \dot{I}_m + \dot{I}_{1L} \quad \text{I}_L \text{ 负载分量随负载不同而变化。}$$

在额定负载时, I_{1L} 比 I_m 大很多, 负载分量是 I_1 中的主要部分。

2. 电动势平衡式:

除了主磁通在原、副边绕组中感应电动势 E_1 和 E_2 外, 原、副边还有对应于漏磁通产生的漏电势。

原边: $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_1 r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_{1\sigma} = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$

副边: $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{2\sigma} - \dot{I}_2 r_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j\dot{I}_2 x_{2\sigma} = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L$$



三、变压器的折算法

- 当 k 较大时，变压器原、副边电压相差很大，为计算和作图带来不便。
- 变压器原边和副边没有直接电路的联系，只有磁路的联系。副边的负载通过磁势影响原边。因此只有副边的磁势不变，原边的物理量没有改变。这为折算提供了依据。

这种保持磁势不变而假想改变它的匝数与电流的方法，称折合算法。



变压器参数的具体折算

由于原、副绕组的匝数 N_1 N_2 ，原、副绕组的感应电动势 E_1 E_2 ，这就给分析变压器的工作特性和绘制相量图增加了困难。为了克服这个困难，常用一假想的绕组来代替其中一个绕组，使之成为变比 $k=1$ 的变压器，这样就可以把原、副绕组联成一个等效电路，从而大大简化变压器的分析计算。这种方法称为绕组折算。折算后的量在原来的符号上加一个上标号 “’” 以示区别。

折算的本质

在由副方向原方折算时，由于副方通过磁动势平衡对原方产生影响，因此，只要保持副方的磁动势不变，则变压器内部电磁关系的本质就不会改变。即折算前后副方对整个回路的电磁关系的影响关系不能发生变化！

副方各量折算方法如下：

副方电流的折算值

$$N_1 \boxed{I_2} = N_2 \dot{I}_2$$

$$\boxed{I_2} = \frac{N_1}{N_2} \dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_2}{k}$$

付方电动势的折算值

由于折算前后主磁通和漏磁通均未改变，根据电动势与匝数成正比关系可得

$$\dot{E}_2' = \frac{N_1}{N_2} \dot{E}_2 = k \dot{E}_2$$

$$\dot{E}_{2\sigma}' = k \dot{E}_{2\sigma}$$

付方漏阻抗的折算值

根据折算前后副绕组铜损耗不变的原则

$$R_2' = \left(\frac{I_2}{I_2'}\right)^2 R_2 = k^2 R_2$$

由

$$x_{2\sigma} = \left(\frac{I_2}{I_2'}\right)^2 x_{2\sigma} = k^2 x_{2\sigma}$$

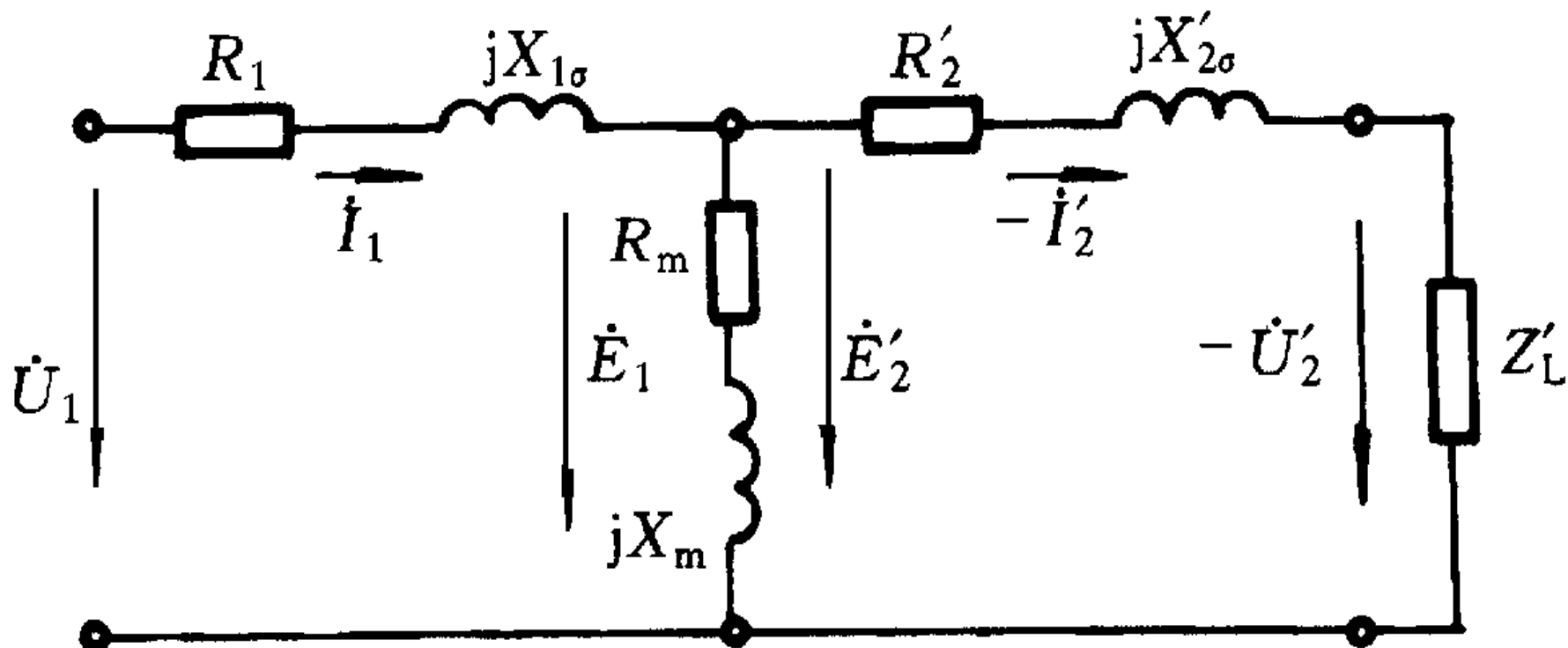
所

$$Z_2' = R_2' + jx_{2\sigma}' = k^2 (R_2 + jx_{2\sigma}) = k^2 Z_2$$

折算后基本方程式、等效电路和相量图

基本方程式：

等效电路：



等效电路

1. “T”型等效电路

由原边AX端看存在：

$$\begin{aligned} Z &= \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{-\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1}{\dot{I}_1} = z_1 + \frac{-\dot{E}_1}{\dot{I}_0 + (-\dot{I}_2')} \\ &= z_1 + \frac{1}{\frac{\dot{I}_0}{-\dot{E}_1} + \frac{\dot{I}_2'}{\dot{E}_2}} = z_1 + \frac{1}{\frac{1}{z_m} + \frac{1}{z_2 + z_L}} \end{aligned}$$

等效电路

“T”型简化等效电路

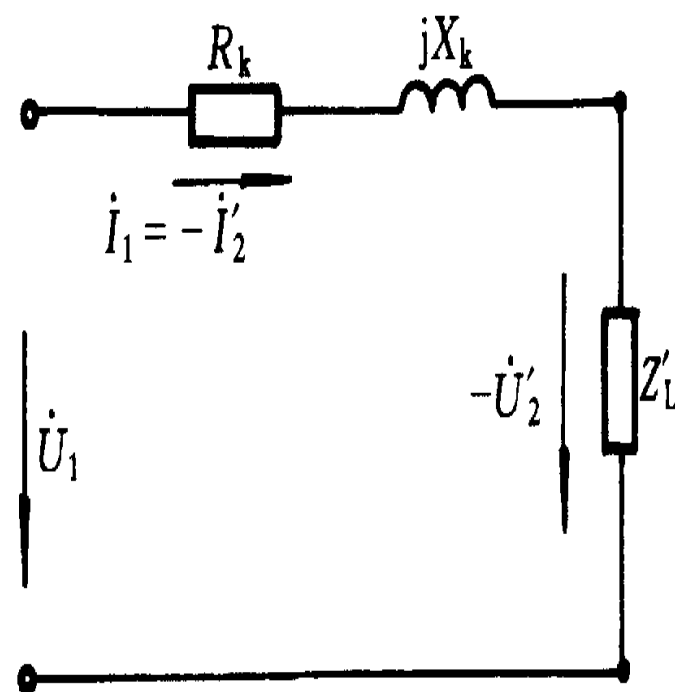
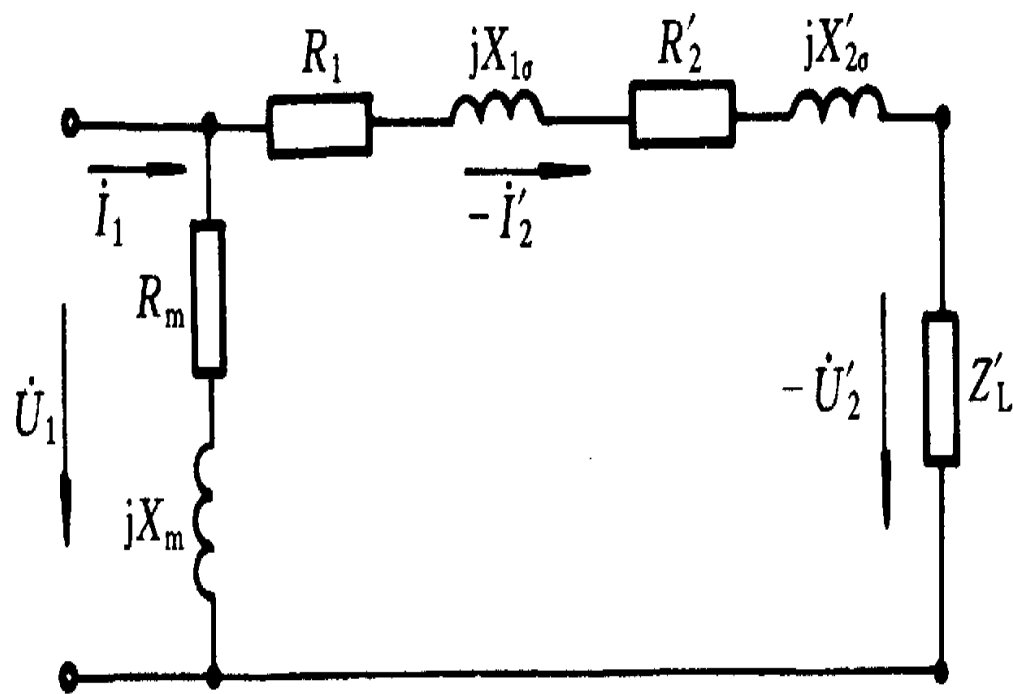
“T”型等效电路虽能准确反映变压器内部电磁关系，但它是串、并联电路，计算较复杂。由于

$$z_1 \ll z_m$$

为了简化计算，将励磁支路左移到电源端，使其成为“T”等效电路，如图所示，近似后所引起的误差工程上允许。

等效电路图的简化

当 $Z_m \gg Z_1$, $I_1 N \gg I_0$, 当负载变化时, 变化很小, 可以认为不随负载的变化而变化。
这样, 可把T型等效电路进行简化处理



$$R_k = R_1 + R'_2$$

$$x_k = x_{1\sigma} + x'_{2\sigma}$$

$$Z_k = Z_1 + Z'_2 = R_k + jx_k$$

通常在做定性分析时用相量图比较形象直观，而在做定量计算时用等效电路比较简便。

等效电路

如果令

$$z_k = r_k + jx_k = z_1 + z_2' = (r_1 + r_2') + j(x_1 + x_2')$$

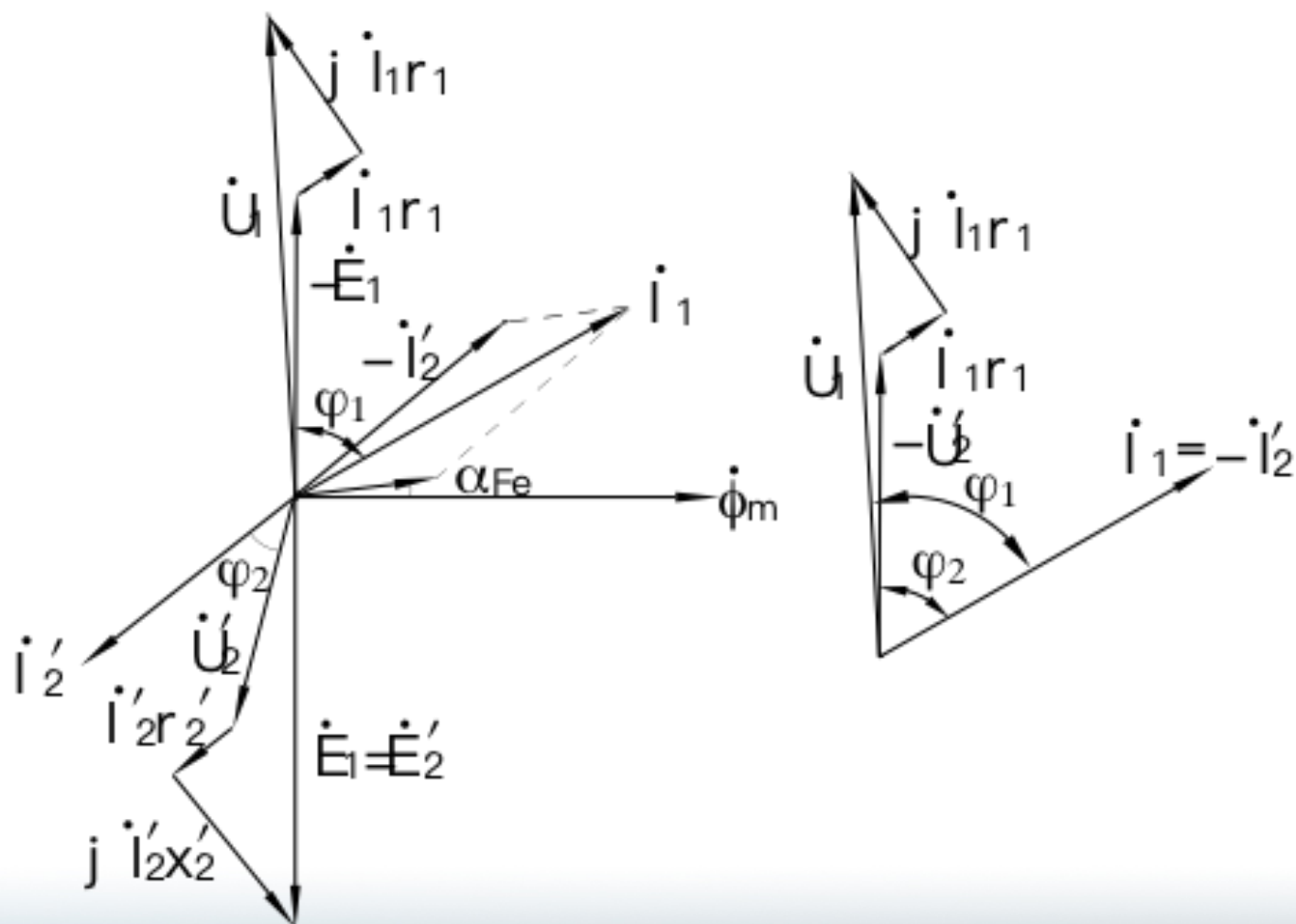
式中 z_k 、 r_k 、 x_k 分别称为短路阻抗、短路电阻和短路电抗

，它们统称为变压器的短路参数，可通过短路试验测得。

相量图

相量图能直观的表现变压器各物理量之间的相位关系。变压器所带的负载不同，相量图也不同，通常变压器的负载为感性。

相量图



(a) T型等效电路相量图

(b) 简化等效电路相量图

图4-14 变压器带感性负载运行时的相量图

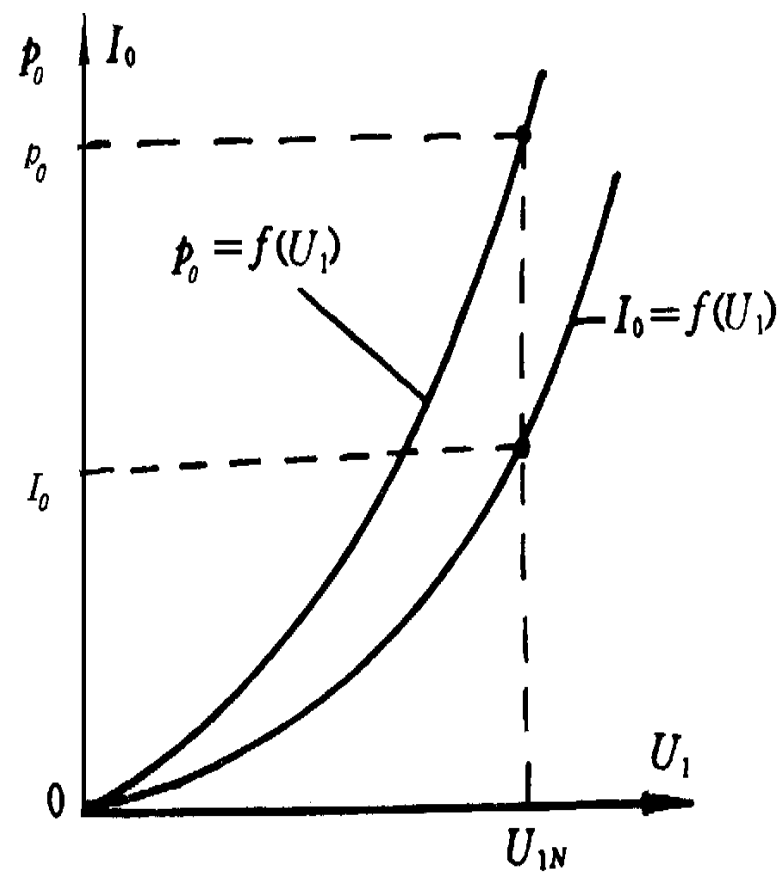
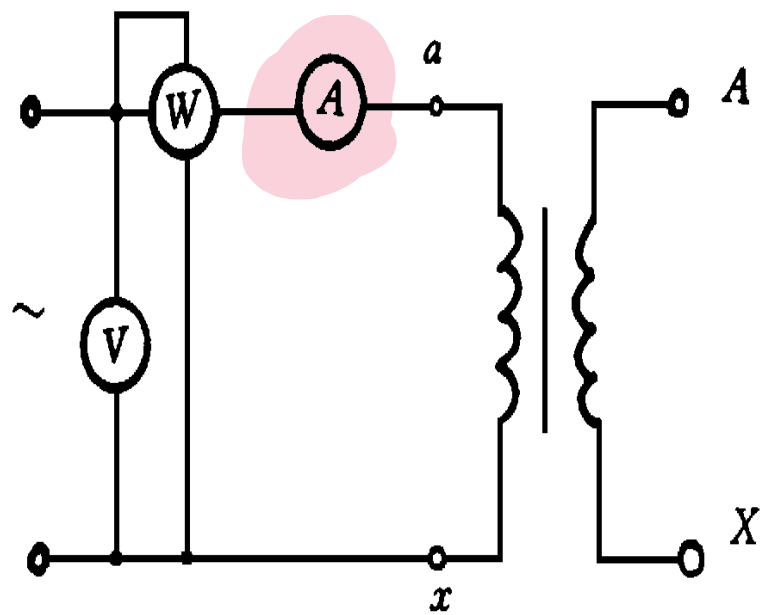
变压器参数的测定

变压器等效电路中的各种电阻、电抗或阻抗如 R_k, X_k, R_m, X_m 等称为变压器的参数，它们对变压器运行能有直接的影响。所以，我们有必要看一下各种参数是如何通过实验的方法测定的。

一、空载实验：

试验目的：测定变压器的空载电流 I_0 、变比 K 、空载损耗 P_0 及励磁阻抗 $Z_m = R_m + jX_m$

空载试验接线，如图所示



参数的试验测定

为了便于测量和安全，空载试验一般在副边做，即在低压绕组 a_x 上加电压 U_{2N} ，高压绕组 A_X 开路，测量电压 U_2 、空载电流 I_{20} 、输入功率 P_0 和开路电压 U_{10} 。

因变压器空载时无功率输出，所以输入的功率全部消耗在变压器的内部，为铁心损耗 p_{Fe} 和空载铜耗 $I_{20}^2 r_2$ 之

和，但空载电流 I_{20} 很小， $p_{Fe} \gg I_{20}^2 r_2$ ，故可忽略空载铜

参数的试验测定

根据测得的空载试验数据可计算单相变压器的

参数：

$$k = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_{2N}}{U_{10}}$$

变比为：

空载阻抗： $z_0 = \frac{U_{2N}}{I_{20}}$

空载电阻：

$$r_0 = \frac{P_0}{I_{20}^2}$$

其中 $z_0 = z_1 + z_m$ ； $r_0 = r_1 + r_m$ 。

参数的试验测定

$$Z_m \gg Z_1; \quad r_m \gg r_1$$

由于

可认为

励磁阻抗:

$$Z_m \approx Z_0 = \frac{U_{2N}}{I_{20}}$$

励磁电阻:

$$r_m \approx r_0 = \frac{P_0}{I_{20}^2}$$

励磁电抗:

$$x_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2}$$

参数的试验测定

由于空载试验在低压侧做，计算所得的励磁参数是低压侧的值，如需折算到高压侧，各计算值应乘 k_2 ，还应注意的是，励磁参数随电压的大小而变化计算时要取额定电压下的数据。对于三相变压器测得的功率是三相的，而励磁参数是指每一相的，故在计算时应将三相功率除以3，即取一相功率计算，同时应将测得的线值数据转换成相值数据。

注意： 1.由于励磁参数与磁路的饱和程度有关，故应取额定电压下的数据来计算励磁参数。

2.对于三相变压器，按上式计算时 U_1 、 I_0 、 p_0 均为每相值。但测量给出的数据却是线电压、线电流和三相总功率，

3.此时的空载损耗 p_0 为铁耗。由于空载试验是在低压侧进行的，故测得的励磁参数是折算至低压侧的数值。如果需要折算到高压侧，应将上述参数乘 k^2 。这里 k 是变压器的变化，可通过

$$k = \frac{U_{1N}}{U_{20}} = \frac{U_{1N}}{U_{ax}}$$

短路实验

实验过程：

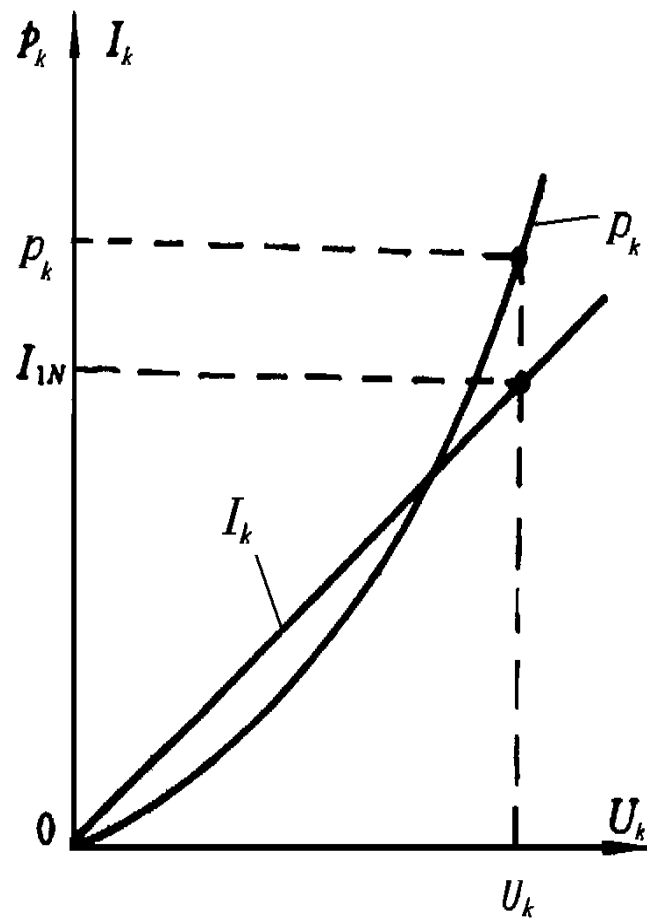
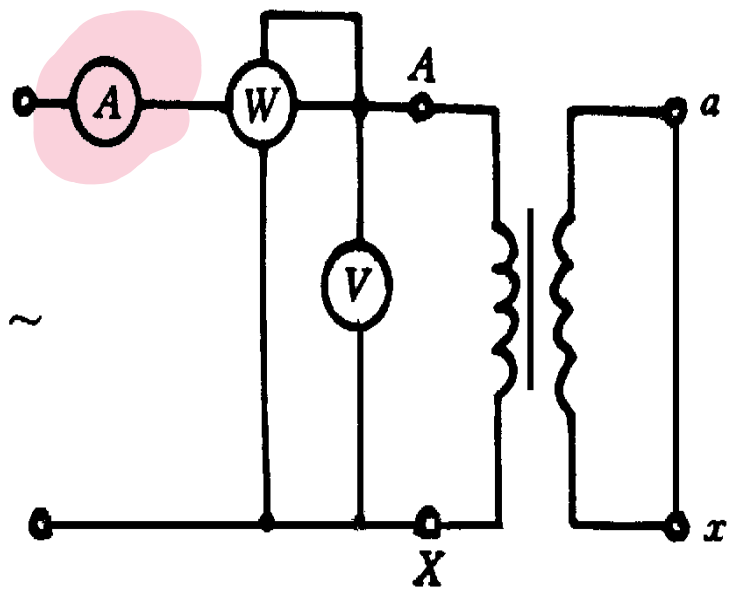
将变压器的副边直接短路，副边的电压等于零，称为变压器短路运行方式。

实验方法：

为便于测量，通常在高压侧加电压，将低压侧短路。短路试验将在降低电压下进行，使 I_k 不超过 $1.2I_{IN}$ 。

实验目的：

在不同的电压下测出短路特性曲线 $I_k=f(U_k)$



$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{U_k}{I_{1N}}$$

$$R_k = \frac{P_k}{I_k^2} = \frac{P_k}{I_{1N}^2}$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

注意：1.短路时，从短路的等效电路图可以看出，此时的短路损耗以铜耗为主 2.因电阻会随着温度发生变化，所以，我们的所得值要换算到标准工作温度下75度：

$$R_{k75^\circ C} = R_k \frac{234.5 + 75}{234.5 + \theta} \quad (\text{对铜导线而言})$$

$$R_{k75^{\circ}\text{C}} = R_k \frac{228 + 75}{228 + \theta} \quad (\text{对铝线})$$

所以，相应的 $\sqrt{R_{k75^{\circ}\text{C}}^2 + x_k^2}$

$$Z_{k75^{\circ}\text{C}} =$$

短路损耗和短路电压也应换算到750C的值

$$p_{kN} = \frac{p_k}{I_k^2} R_{k75^{\circ}\text{C}}$$

$$U_{kN} = I_{1N} Z_{k75^{\circ}\text{C}}$$

对于三相变压器，按上式计算时
 p_k 、 I_k 、 U_k 均为一相的数值。

【例】

一台型号为SL-1250/10三相电力变压器额定数据
 $S_N=1250\text{kV}\cdot\text{A}$ ， $U_{1N}/U_{2N}=10/0.4\text{kV}$ ，Y/Y联接。在低
压侧做空载试验，测得数据为 $U_2=U_{2N}=400\text{V}$ ，
 $I_2=I_{20}=25.4\text{A}$ ， $p_0=2410\text{W}$ 。在高压侧做短路试验，测
得数据

为 $U_1=U_{1k}=440\text{V}$ ， $I_1=I_{1N}=72.17\text{A}$ ， $p_k=13595\text{W}$
在室温 20°C 。试求：1) 折算到原边的励磁阻抗和短
路
阻抗；2) 阻抗电压及其百分值。

【例】

解：（1）计算励磁阻抗和短路阻抗

变压器的变比为 $k = \frac{U_{1N} / \sqrt{3}}{U_{2N} / \sqrt{3}} = \frac{10000 / \sqrt{3}}{400 / \sqrt{3}} = 25$
折算到原边的励磁参数为

$$Z_m = k^2 \frac{U_0 / \sqrt{3}}{I_0} = 25^2 \times \frac{400 / \sqrt{3}}{25.4} = 5683 \Omega$$

$$r_m = k^2 \frac{p_0 / 3}{I_0^2} = 25^2 \times \frac{2410 / 3}{25.4^2} = 778 \Omega$$

$$x_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2} = \sqrt{5683^2 - 778^2} = 5629 \Omega$$

【例】

短路参数为

$$Z_k = \frac{U_k / \sqrt{3}}{I_k} = \frac{440 / \sqrt{3}}{72.17} = 3.52\Omega$$

$$r_k = \frac{p_k / 3}{I_k^2} = \frac{13595 / 3}{72.17^2} = 0.87\Omega$$

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{3.52^2 - 0.87^2} = 3.41\Omega$$

【例】

变压器为铝线，换算到75°C时的参数为

$$r_{k75^{\circ}C} = r_k \frac{228 + 75}{228 + 20} = 0.87 \times \frac{228 + 75}{228 + 20} = 1.06\Omega$$

$$Z_{k75^{\circ}C} = \sqrt{r_{k75^{\circ}C}^2 + x_k^2} = \sqrt{1.06^2 + 3.41^2} = 3.57\Omega$$

【例】

原边漏阻抗、电阻、漏电抗在75°C时的参数为

$$Z_1 \approx Z_2' = \frac{1}{2} Z_{k75^\circ\text{C}} = \frac{1}{2} \times 3.57 = 1.785\Omega$$

$$r_1 \approx r_2' = \frac{1}{2} r_{k75^\circ\text{C}} = \frac{1}{2} \times 1.06 = 0.53\Omega$$

$$x_1 \approx x_2' = \frac{1}{2} x_k = \frac{1}{2} \times 3.41 = 1.705\Omega$$

【例】

副边漏阻抗、电阻、漏电抗为

$$Z_2 = \frac{Z_2'}{k^2} = \frac{1.785}{25^2} = 0.0029\Omega$$

$$r_2 = \frac{r_2'}{k^2} = \frac{0.53}{25^2} = 0.0008\Omega$$

$$x_2 = \frac{x_2'}{k^2} = \frac{1.705}{25^2} = 0.0027\Omega$$

【例】

(2) 计算阻抗电压及其百分值

阻抗电压为

$$U_k = I_{1N} Z_{k75^\circ C} = 72.17 \times 3.57 = 257.65V$$

阻抗电压百分值为

$$\Delta u_k = \frac{U_k}{U_{1N} / \sqrt{3}} \times 100\% = \frac{257.65}{10000 / \sqrt{3}} \times 100\% = 4.46\%$$

【例】

注意：

三相变压器试验时测得的功率是三相的总值，而参数计算是指每一相的值，要注意换算。空载试验在副边做一是为了安全，二是为了便于读数。

【例】

短路电压一般标于铭牌上，其值大小反映了变压器在额定负载下运行时的漏阻抗压降的大小。从运行角度看，希望此值大些，这样使输出电压的受负载波动影响小些；但阻抗电压小时，变压器发生短路故障的短路电流必然很大，可能会损害变压器。因此电力变压器的短路电压在某个范围，一般中小容量短路电压百分值为4~10.5%。

变压器的运行特性

变压器的运行特性有外特性 $U_2=f(I_2)$ 和效率特性 $\eta=f(I_2)$ ，而变压器的主要性能指标是电压变化率。

变压器的运行特性

I. 电压变化率和外特性

变压器外特性是指当 $U_1=U_{1N}$, $\cos\varphi_2=\text{常数}$ 时, 副边端电压随负载电流变化的规律, 即: $U_2=f(I_2)$

曲线。由于变压器内部存在漏阻抗, 当有负载电流时, 就会产生电压降, 所以输出电压是随负载电流变化而变化的, 其变化规律与负载的性质有关。

变压器的运行特性

电压变化率:

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N}} \times 100\%$$

$$= \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100\%$$

$$= \frac{U_{1N} - U_2'}{U_{1N}} \times 100\%$$

变压器的运行特性

根据简化等效电路的相量图可推导出电压变化率的公式为

$$\Delta U^* = \frac{U_{1N} - U_2'}{U_{1N}} \times 100\% = \beta \frac{I_{1N}(r_k \cos \varphi_2 + x_k \sin \varphi_2)}{U_{1N}} \times 100\%$$

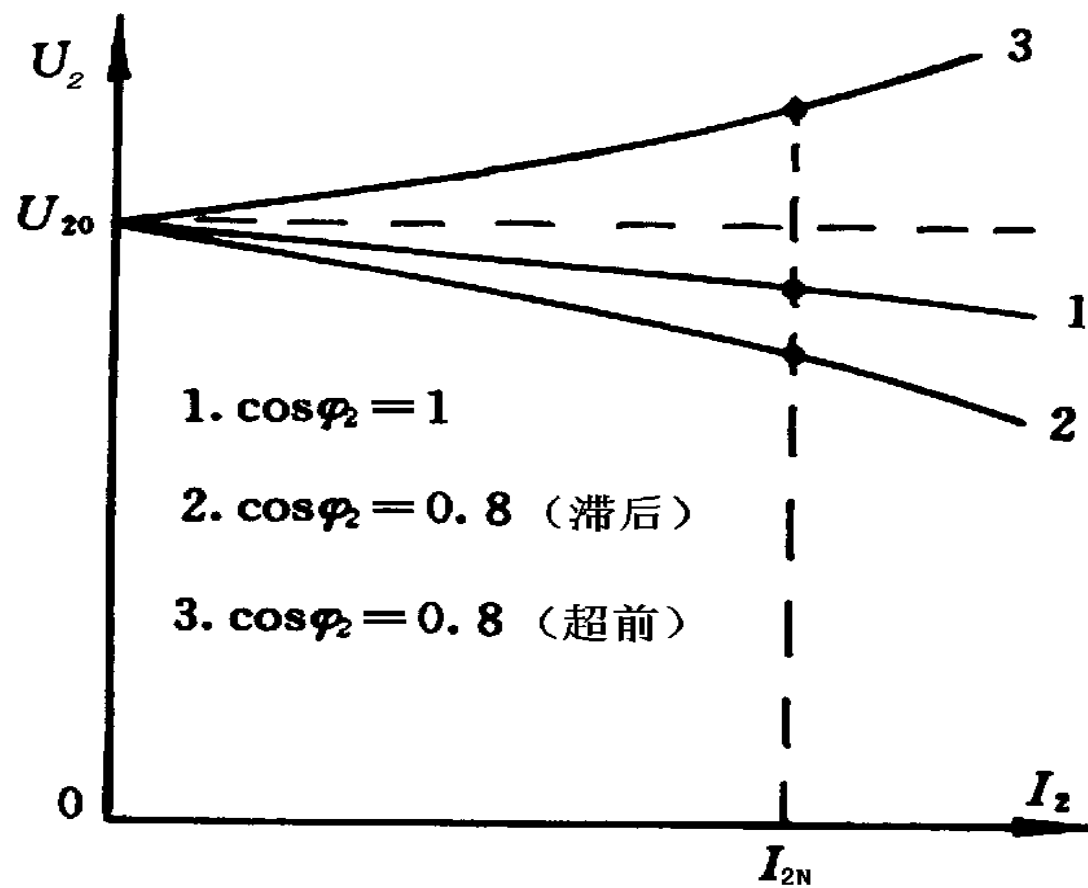
式中 $b=I_1/I_{1N}=I_2/I_{2N}$ ，称为变压器的负载系数。若用

标么值表示时，电压变化率公式为

$$\Delta U^* = \beta (r_k^* \cos \varphi_2 + x_k^* \sin \varphi_2)$$

变压器的运行特性

变压器的电压变化率与短路参数 r_k 和 x_k 、负载系数 β 、负载功率因数角 φ_2 有关，当负载为电阻性或感性时，电压变化率 $\Delta U^* > 0$ ，且电阻性负载的电压变化率小于感性负载的电压变化率；当负载容性时，一般情况下， $|r_k \cos \varphi_2| < |x_k \sin \varphi_2|$ ，使电压变化率 $\Delta U^* < 0$ ，外特性上翘。



变压器的损耗和效率：

变压器的功率关系：

变压器原边从电网吸收电功率 P_1 ，其中很小部分功率消耗在原绕组的电阻

上 $p_{cu1}=mI_1^2R_1$ 和铁心损耗

上 $p_{Fe}=mI_0^2R_m$ ，其余部分通过电磁感应传给副绕组，称为电磁功率 P_M ，副绕组获得

的电磁功率中又有很小部分消耗在副绕组

的电阻上 $p_{cu2}=mI_2^2R_2$ ，其余的传输给负

载，即输出功率：

变压器的功率关系表示如下

$$P_1 = p_{cu1} + p_{Fe} + p_{cu2} + P_2$$

所以变压器的效率为：

$$\eta = \frac{p_2}{p_1} \times 100\% = \frac{p_1 - \sum p}{P_1} \times 100\%$$

效率的求解：

按给定负载条件直接给变压器加负载，测出输出和输入有功功率就可以计算出来,这种方法称为直接负载法

- 变压器负载运行时,将产生铁耗和铜耗.
- 1、基本铁耗：由铁芯中的磁通密度、频率、材料和重量所决定的磁滞损耗与涡流损耗。2、附加铁耗：叠片间绝缘损伤引起的局部涡流损耗，结构件中的涡流损耗，高压变压器绝缘材料中的介质损耗等，占基本铁耗的15%-20%。
- 1、基本铜耗：原、副边线圈的直流电阻损耗 2、附加铜耗：集肤效应和邻近效应使导线中电流分布不均匀所增加的铜耗。
- 当电压为额定值时，空载电流仅为额定电流的2%-10%，铜耗可以忽略，因此额定电压时的空载损耗就是变压器的铁耗，由于变压器的主磁通从空载到负载基本不变，所以变压器的铁耗不变，称为不变损耗。
- 变压器短路运行，当短路电流达到额定值时，所需电压仅为额定电压的4.5%-10.5%，此时铁芯的主磁通很小，铁耗和励磁电流均可忽略，此时短路损耗是额定负载时的铜耗。

电力变压器可以应用间接法计算效率，间接法又称损耗分析法。其优点在于无需给变压器直接加负载，也无需运用等效电路计算，只要进行空载试验和短路试验，测出额定电压时的空载损耗 p_0 和额定电流时的短路损耗 p_{kN} 就可以方便地计算出任意负载下的效率。

在应用间接法求变压器的效率时通常作如下假定：

- 1.忽略变压器空载运行时的铜耗，用额定电压下的空载损耗 p_0 来代替铁耗 p_{Fe} ，即 $p_{Fe}=p_0$ ，它不随负载大小而变化，称为不变损耗；
- 2.忽略短路试验时的铁耗，用额定电流时的短路损耗 p_{kN} 来代替额定电流时的铜耗。但需要注意的是：

不同负载时的铜耗与负载系数平方成正比

$$p_{cu} = \beta^2 p_{kN}$$

当短路损耗 p_k 不是在 $I_K=I_N$ 时测的，则

$$p_{kN} = (I_N/I_K)^2 P_K$$

3. 不考虑变压器副边电压的变化，即认为

$U_2=U_{2N}$ 不变，这样便有

$$\begin{aligned} P_2 &= m U_2 I_2 \cos \varphi_2 = m U_{2N} I_{2N} (I_2/I_{2N}) \cos \varphi_2 \\ &= \beta S_N \cos \varphi_2 \end{aligned}$$

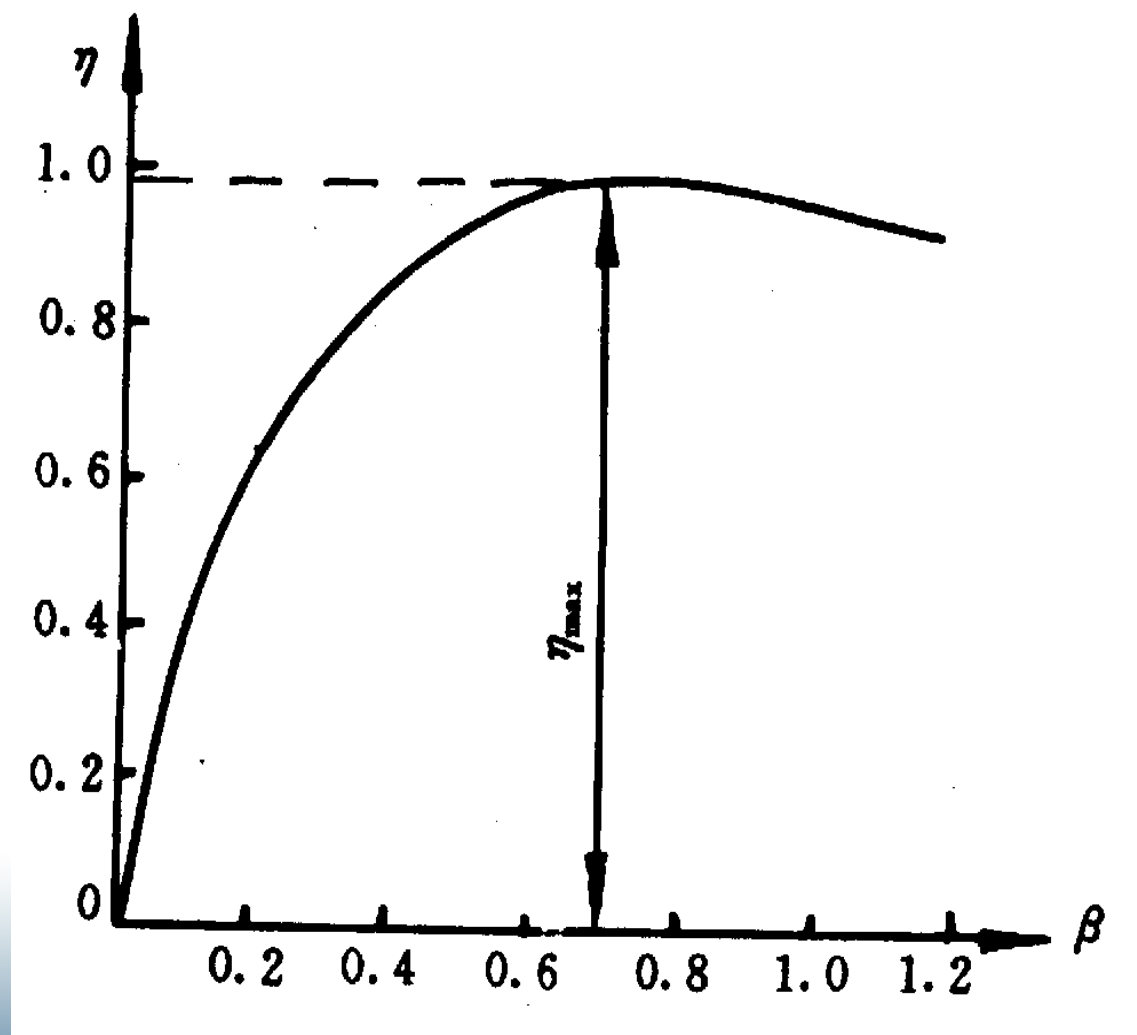
这样，效率的公式可变为：

$$\eta = 1 - \frac{p_0 + \beta^2 p_{kN}}{\beta S_N \cos\varphi_2 + p_0 + \beta^2 p_{kN}} * 100\%$$

以上假定引起误差不大（不超过0.5%），却给计算带来很大方便，电力变压器规定都用这种方法来计算效率。

效率特性：

上式说明，当负载的功率因数 $\cos\varphi_2$ 一定时，效率随负载系数而变化。图为变压器的效率曲线。



特性分析

1. 空载时输出功率为零, 所以 $\eta=0$.
2. 负载较小时, 损耗相对较大, 功率 η 较低.
3. 负载增加, 效率 η 亦随之增加. 超过某一负载时, 因铜耗与成正比增大, 效率 η 反而降低, 最大效率 η 出现在 $\frac{d\eta}{d\beta}=0$ 的地方. 因此, 取 η 对 β 的导数, 并令其等于零, 即可求出最高效率 η_{\max} 时的负载系数 β_m

$$\beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{kN}}}$$

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{2 p_0}{\beta_m S_N \cos \varphi_2 + 2 p_0} \times 100\%$$

即当不变损耗（铁耗）等于可变损耗（铜耗）时效率最大。

由于变压器总是在额定电压下运行，但不可能长期满负载。为了提高运行的经济性，通常设计成 $\beta_m = 0.5 \sim 0.6$ ，这样，

$$\frac{P_0}{P_{kN}} = \frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}$$

使铁耗较小

