



电机与拖动**课件**之四

变 压 器

胡梦月、韩谷静

纺大电子电气



章节目录

3.1 变压器的基本工作原理和结构

3.2 单相变压器的空载运行

3.3 单相变压器的负载运行

3.4 变压器的参数测定

3.5 标么值

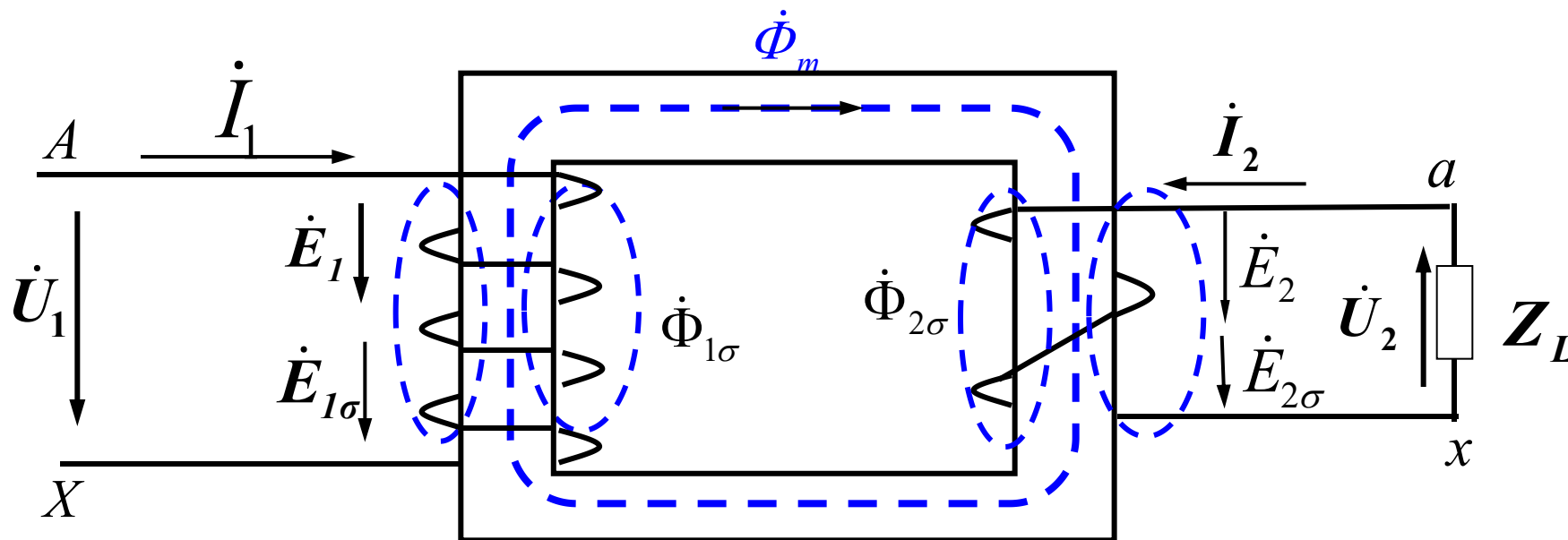
3.6 变压器的运行特性

3.7 三相变压器

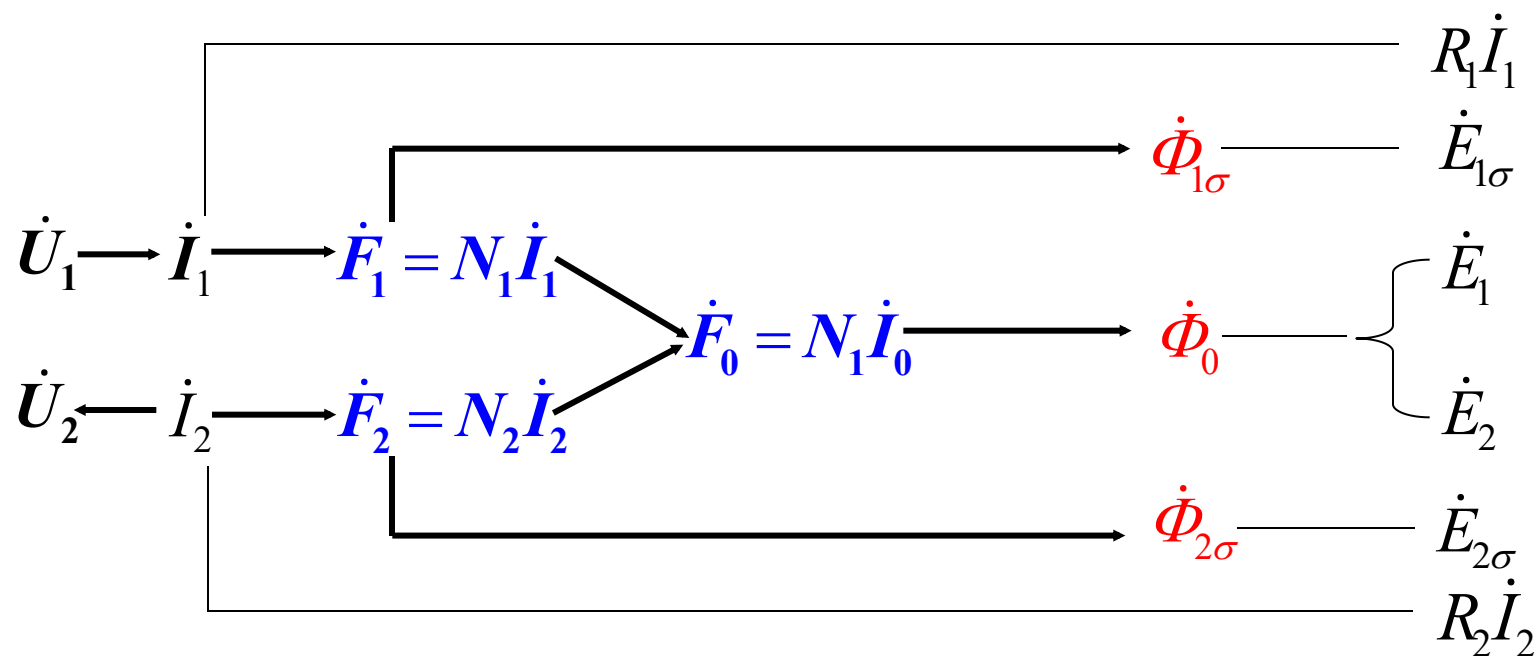
3.8 变压器的并联特性

3.9 特种变压器

➤ 变压器一次侧接在额定频率、额定电压的交流电源上，二次接上负载的运行状态，称为**负载运行**。



用图示负载运行时的电磁过程



一、磁动势平衡方程

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

➤ 空载时，一次磁动势 \dot{F}_0 产生主磁通 $\dot{\Phi}_0$ ；负载时一次磁动势 \dot{F}_1 和二次磁动势 \dot{F}_2 共同作用产生 $\dot{\Phi}_0$ 。

➤ $\dot{\Phi}_0$ 大小主要取决于 U_1 ，只要 U_1 保持不变，由空载到负载， $\dot{\Phi}_0$ 大小基本不变，因此有磁动势平衡方程：

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0 \quad \text{或} \quad N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 = N_1 \dot{I}_0$$

用电流形式表示 $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1}\right) \dot{I}_2 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{\dot{I}_2}{k}\right) = \dot{I}_0 + \dot{I}_{1L}$

表明：变压器的负载电流包括两个分量，一个是励磁电流 \dot{I}_0 ，它用来产生主磁通；

另一个是负载分量 \dot{I}_{1L} ，它起平衡二次磁动势的作用。

电磁关系将一、二次联系起来，二次电流增加或减少必然引起一次电流的增加或减少。



负载运行时,忽略空载电流有:

$$\dot{I}_1 \approx -\frac{\dot{I}_2}{k} \text{ 或 } \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{1}{k} = \frac{N_2}{N_1}$$

➤ 表明, 一、二次电流比近似与匝数成反比。可见, 匝数不同, 不仅能改变电压, 同时也能改变电流。

二、电动势平衡方程

根据基尔霍夫电压定律可写出一、二次侧电动势平衡方程

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j\dot{I}_2 X_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$$

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



一、折算

1. 利用变压器基本方程组进行定量计算存在的问题

- (1) 复数方程联立解相当繁琐;
- (2) 电力变压器的变比 K 比较大, 使一、二次绕组的电压、电流、阻抗值相差很大, 计算不方便, 画图困难。

➤ **折算**: 将变压器的二次 (或一次) 绕组用另一个绕组($N_2=N_1$)来等效, 同时对该绕组的电磁量作相应的变换, 以保持两侧的电磁关系不变, 用一个等效的电路代替实际的变压器。

2. 折算法原则

- (1) 保持原有的电磁关系不变。 **二次绕组的磁动势不变、输出功率不变、铜损耗不变、主磁通不变**
- (2) 变换二次绕组匝数与一次绕组匝数相等, 即 $K=1$, 称为二次绕组向一次绕组的折算, 各电磁量折算后的数值称为二次侧折算到一次侧的折算值。
- (3) 为与原值相区别, 折算后的量右上角加“'”, 如 U_2' 为二次侧端电压 U_2 的折算值。

折算双向的, 一次侧也可以向二次侧折算。



一、折算

二次绕组各电磁量折算值算法

- 根据折算后磁动势不变

$$N_1 \dot{I}'_2 = N_2 \dot{I}_2 \quad \text{即, } \dot{I}'_2 = \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_2}{K}$$

- 根据主磁通、漏磁通保持不变，感应电动势与匝数成正比

$$\frac{\dot{E}'_2}{\dot{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad \text{同理: } \frac{\dot{E}'_{\sigma 2}}{\dot{E}_{\sigma 2}} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

- 根据铜损耗和无功功率不变

$$R_2 I_2^2 = R'_2 (I'_2)^2 \quad \text{即: } R'_2 = \left(\frac{I_2}{I'_2}\right)^2 R_2 = K^2 R_2$$

$$X_2 I_2^2 = X'_2 (I'_2)^2 \quad \text{即: } X'_2 = \left(\frac{I_2}{I'_2}\right)^2 X_2 = K^2 X_2$$



一、折算

二次绕组各电磁量折算值算法

二次绕组漏阻抗折算值：

$$Z'_2 = R'_2 + jX'_2 = K^2 R_2 + jK^2 X_2 = K^2 (R_2 + jX_2) = K^2 Z_2$$

二次端电压折算值：

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - Z'_2 \dot{I}'_2 = K\dot{E}_2 - (K^2 Z_2) \left(\frac{1}{K} \dot{I}_2 \right) = K(\dot{E}_2 - Z_2 \dot{I}_2) = K\dot{U}_2$$

负载阻抗折算值：

$$Z'_L = \frac{\dot{U}'_2}{\dot{I}'_2} = \frac{K\dot{U}_2}{\frac{1}{K}\dot{I}_2} = K^2 \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = K^2 Z_L$$

总结：当二次绕组向一次绕组折算时，电压、电动势的折算值等于原值乘以变比 K ；电阻、电抗、阻抗的折算值等于原值乘以 K^2 ；电流折算值为原值的 $1/K$



一、折算

折算后的方程式为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

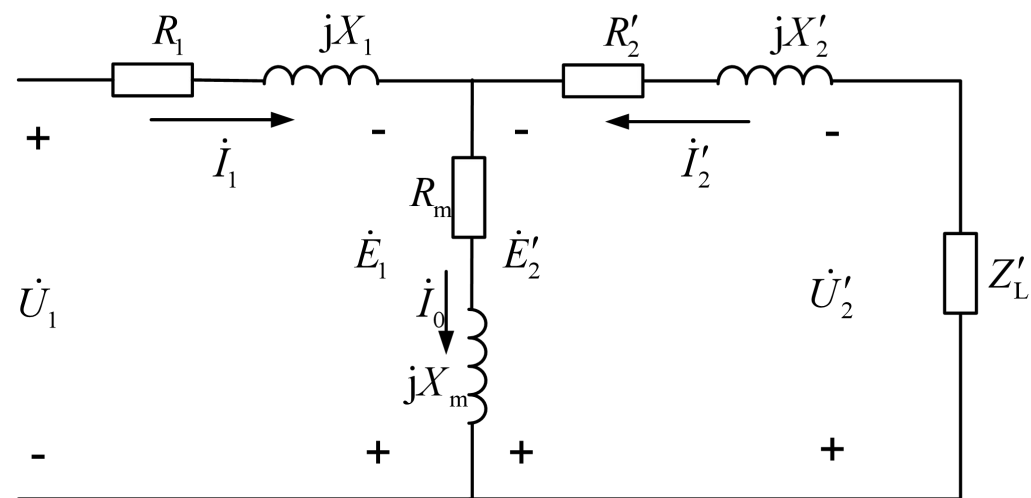
$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 R'_2 - j\dot{I}'_2 X'_2 = \dot{E}'_2 + \dot{I}'_2 Z'_2$$

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

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

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

$$\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 Z'_L$$

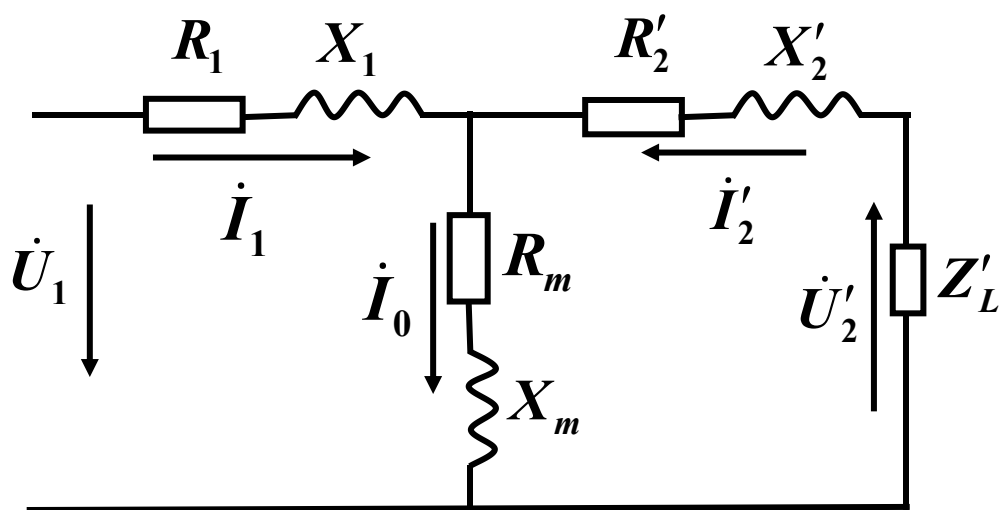


变压器负载运行时的T型等值电路图

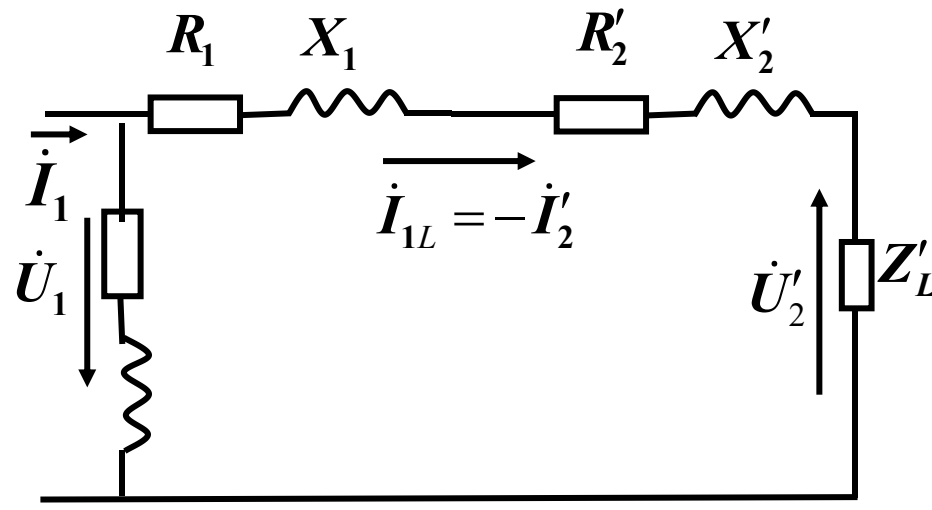


二、等效电路

根据折算后的方程，可以作出变压器的等效电路。



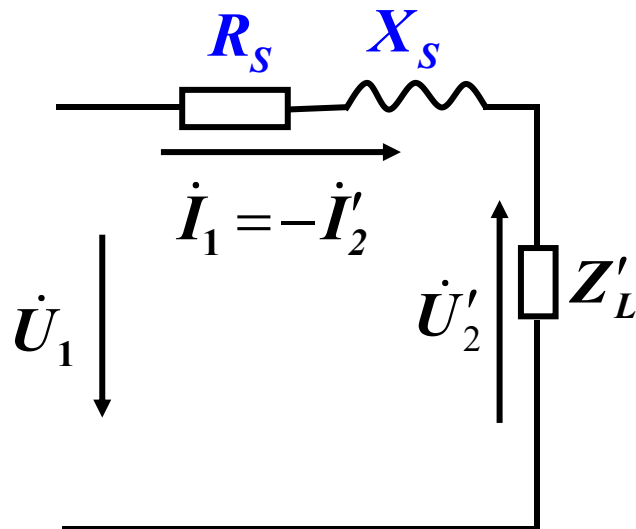
T型等效电路



近似等效电路



二、等效电路



简化等效电路

其中

$$\begin{aligned} R_s &= R_1 + R'_2 \\ X_s &= X_1 + X'_2 \\ Z_s &= R_s + jX_s \end{aligned}$$

分别称为**短路电阻**、**短路电抗**和**短路阻抗**。

➤ 由简化等效电路可知，短路阻抗起限制短路电流的作用，由于短路阻抗值很小，所以变压器的短路电流值较大，一般可达额定电流的10~20倍。



三、相量图

根据变压器负载运行时折算后的基本方程式，和T型等值电路及简化等值电路，能够画出不同性质负载时的相量图和简化相量图。它清楚地表明各物理量的大小和相位关系。其步骤为：

1、理论计算

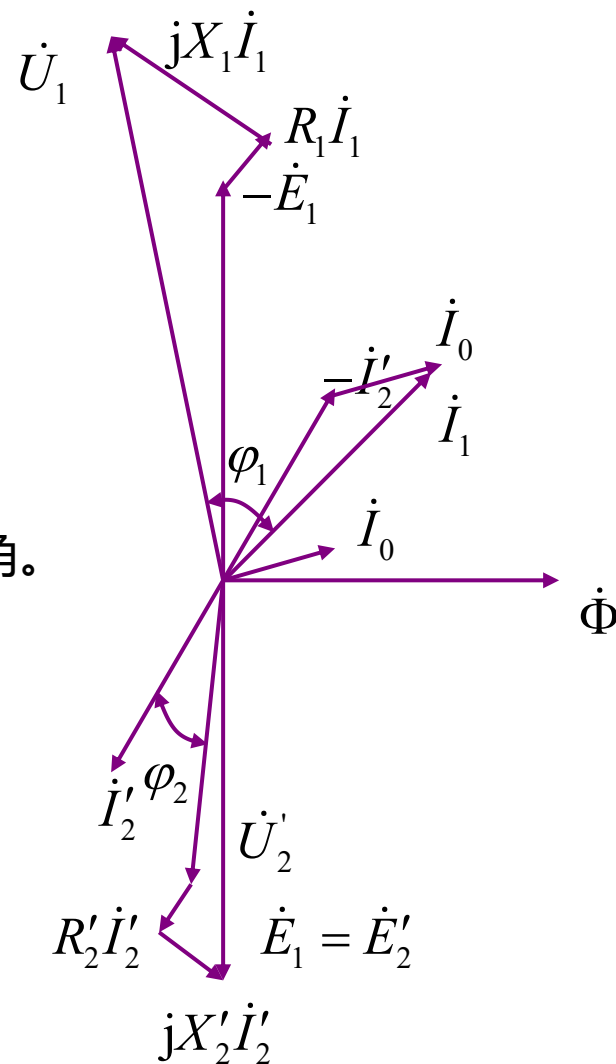
- (1) 通过实验方法获得变压器变比 K 、一次侧的励磁阻抗 $Z_m = R_m + jX_m$ 、漏阻抗 $Z_1 = R_1 + jX_1$ 、二次侧漏阻抗 $Z_2 = R_2 + jX_2$ 、负载阻抗 $Z_L = R_L + jX_L$ 和端电压 U_2 。
- (2) 二次侧向一次侧折算，求取 $R'_2, X'_2, R'_L, X'_L, U'_2$
- (3) 求取 $\dot{I}'_2 = \dot{U}'_2 / Z'_L$ ；负载阻抗角 $\varphi_2 = \arctan(X'_L / R'_L) = \arctan(X_L / R_L)$ 。暂且认为 $\dot{U}'_2 = U'_2 \angle 0^\circ$ ，则 $\dot{I}'_2 = I'_2 \angle -\varphi_2$
- (4) 求取 $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + R'_2 \dot{I}'_2 + jX'_2 \dot{I}'_2$
- (5) 求取主磁通幅值 $\Phi_m = E_1 / 4.44 f N_1$



三、相量图

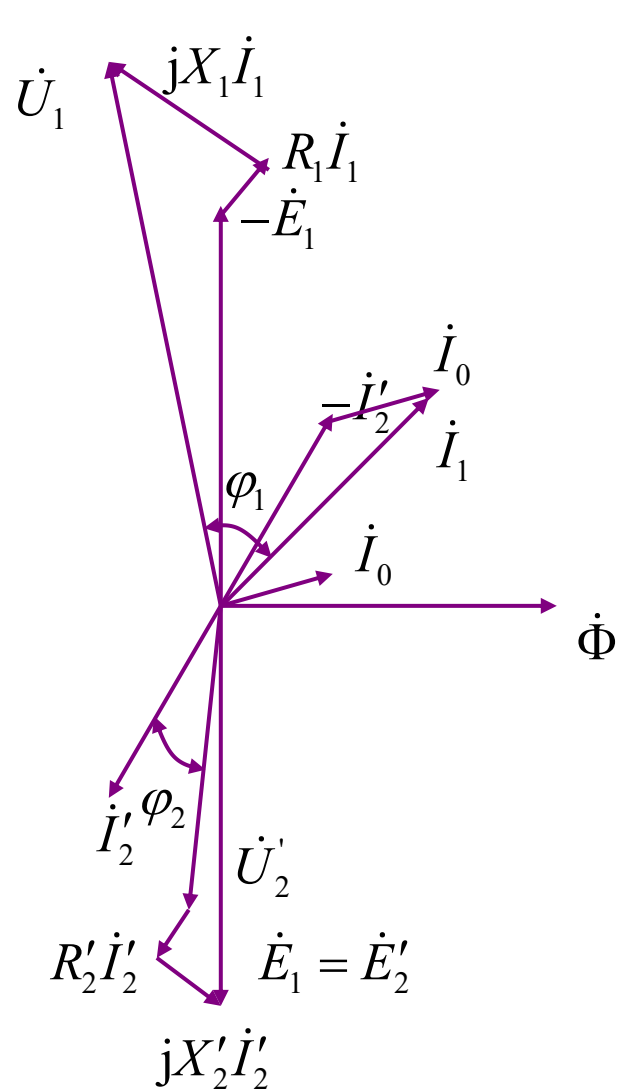
2、绘制相量图

- (1) 绘制主磁通相量 $\dot{\Phi}$ ，模值为 Φ_m ，相角为 0° 。
- (2) 绘制 $\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$ ，模值为 $E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$ ，相角为滞后 $\dot{\Phi} 90^\circ$ ，即 -90° 。
- (3) 绘制 $-\dot{E}_1$ ，由 $\dot{I}_0 = -\dot{E}_1 / Z_m$ ，画出 \dot{I}_0 ， $\theta_0 = \arctan \frac{X_m}{R_m}$ 称为铁损耗角。
- (4) 绘制 $-\dot{I}_2'$ ，由 $\dot{I}_2' = \dot{E}_2' / (Z_2' + Z_m)$ 。
- (5) 绘制 \dot{I}_1 ，由 $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2'$ 。
- (6) 绘制 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1$
- (7) 绘制 \dot{U}_2' ，由 $\dot{E}_2' = \dot{U}_2' + R_2' \dot{I}_2' + jX_2' \dot{I}_2'$

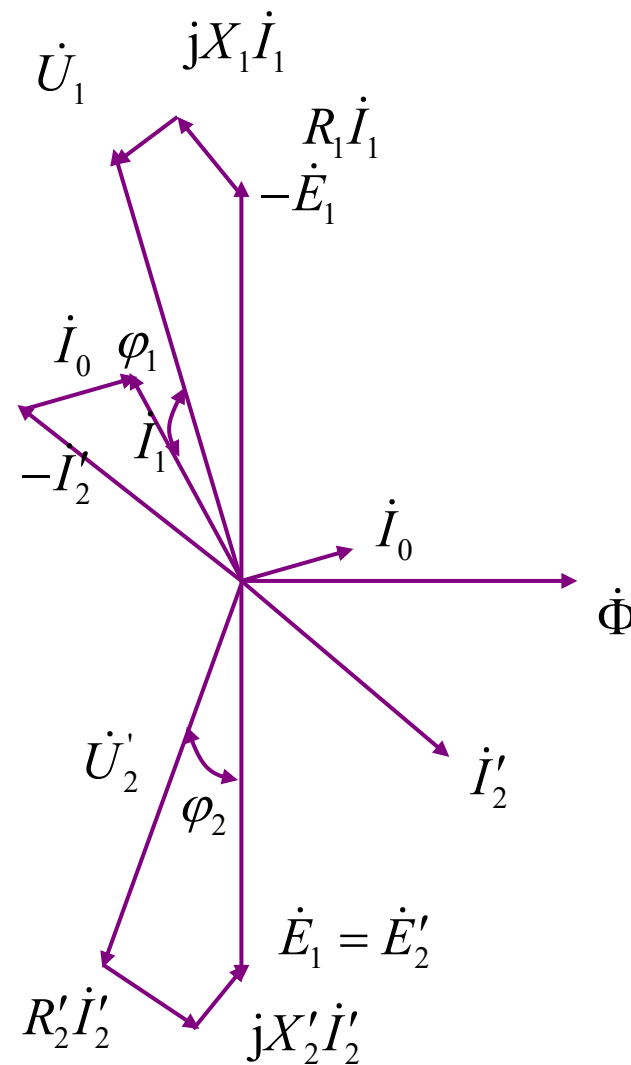


感性负载

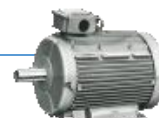




电感性负载



电容性负载



例：一台三相变压器,YY接法, $S_N=800\text{kV}\cdot\text{A}$, $U_{1N}/U_{2N}=10/0.4\text{kV}$, $Z_K=R_K+jX_K=1.4+j6.48\Omega$, 负载 $Z_L=0.2+j0.07\Omega$, Y接法。试求:

- (1) 变压器一次、二次电流 I_1 和 I_2 (线值) ;
- (2) 二次绕组端电压 (线值) ;
- (3) 输入、输出的视在功率、有功功率、无功功率及效率

解：题目中给出了短路阻抗，故采用简化等值电路计算：

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{1N}/\sqrt{3}}{U_{2N}/\sqrt{3}} = \frac{10 \times 10^3 / \sqrt{3}}{400 / \sqrt{3}} = 25$$

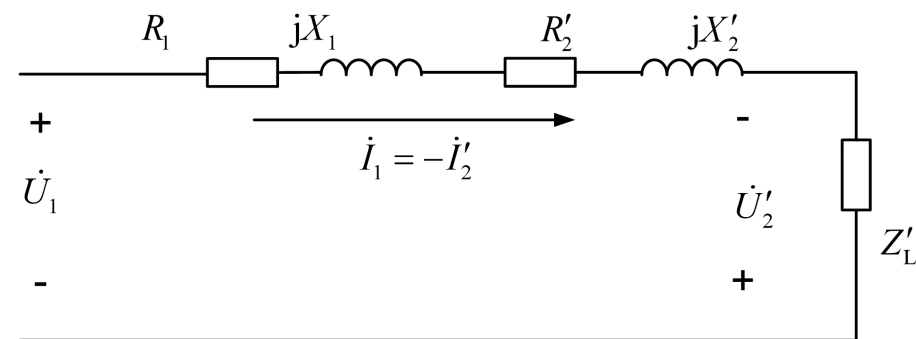
$$Z_L = 0.2 + j0.07\Omega = 0.212 \angle 19.29^\circ \Omega$$

$$Z'_L = K^2 Z_L = 25^2 \times (0.2 + j0.07)\Omega = 125 + j43.7\Omega$$

$$Z = Z_K + Z'_L = [(1.4 + j6.48) + (125 + j43.7)]\Omega = 136 \angle 21.7^\circ \Omega$$

$$(1) \text{ 一次绕组电流 } I_1 = \frac{U_1}{Z} = \frac{U_{1N}/\sqrt{3}}{Z} = \frac{10 \times 10^3 / \sqrt{3}}{136} \text{ A} = 42.25 \text{ A}$$

$$\text{二次绕组电流: } I_2 = KI_1 = 25 \times 42.25 \text{ A} = 1061.25 \text{ A}$$



(2) 二次绕组端电压(线值): $U_{2L} = \sqrt{3}U_2 = \sqrt{3}Z_L I_2 = \sqrt{3} \times 0.212 \times 1061.25 \text{V} = 389.7 \text{V}$

(3) 一次输入的视在功率: $S_1 = \sqrt{3}U_{1N}I_1 = \sqrt{3} \times 10 \times 10^3 \times 42.25 \text{A} = 735 \text{kVA}$

一次输入的有功功率: $P_1 = \sqrt{3}U_{1N}I_1 \cos \varphi_1 = \sqrt{3}U_{1N}I_1 \cos 21.7^\circ = \sqrt{3} \times 10 \times 10^3 \times 42.25 \times 0.93 \text{W} = 683.8 \text{W}$

一次输入的无功功率: $Q_1 = \sqrt{3}U_{1N}I_1 \sin \varphi_1 = \sqrt{3}U_{1N}I_1 \sin 21.7^\circ = \sqrt{3} \times 10 \times 10^3 \times 42.25 \times 0.37 \text{W} = 271.4 \text{kW}$

二次输出的视在功率: $S_2 = \sqrt{3}U_{2L}I_2 = \sqrt{3} \times 389.7 \times 1061.25 \text{VA} = 716.3 \text{kW}$

二次输出的有功功率: $P_2 = S_2 \cos \varphi_2 = S_2 \cos 19.29^\circ = 716.3 \times 0.94 \text{kW} = 673.3 \text{kW}$

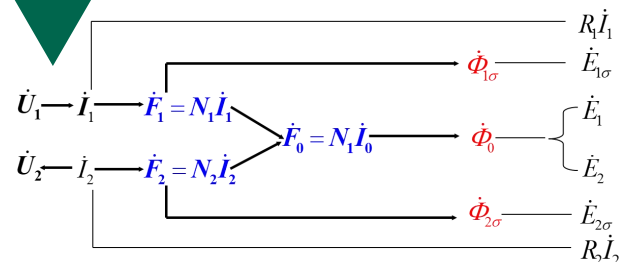
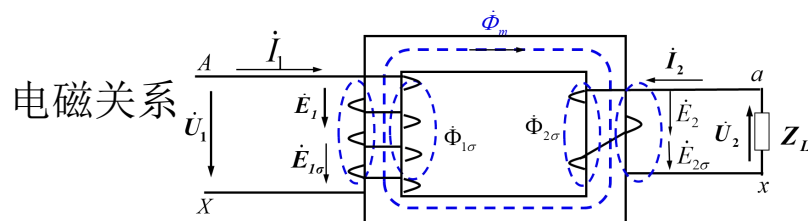
二次输出的无功功率: $Q_2 = S_2 \sin \varphi_2 = S_2 \sin 19.29^\circ = 716.3 \times 0.33 \text{W} = 236.4 \text{kW}$

变压器的效率: $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{673.3}{683.8} = 98.64\%$



小结

负载运行



磁动势平衡

由空载 \dot{I}_0, \dot{F}_0 \longrightarrow 负载 $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{F}_1 + \dot{F}_2$

用电流形式表示 $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\frac{N_2}{N_1})\dot{I}_2 = \dot{I}_0 + (-\frac{\dot{I}_2}{k}) = \dot{I}_0 + \dot{I}_{1L}$

或 $N_1\dot{I}_1 + N_2\dot{I}_2 = N_1\dot{I}_0$

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

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

负载运行时,忽略空载电流有: $\dot{I}_1 \approx -\frac{\dot{I}_2}{k}$ 或 $\frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \approx \frac{1}{k} = \frac{N_2}{N_1}$

电动势平衡方程

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j\dot{I}_2 X_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$$

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

折算

折算原则: 原有的电磁关系不变。折算前后磁动势不变; 磁通不变; 铜损耗不变; 输出功率不变

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' R_2' - j\dot{I}_2' X_2' = \dot{E}_2' + \dot{I}_2' Z_2'$$

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

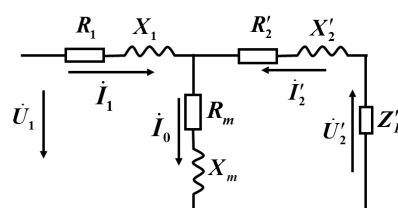
$$\dot{E}_2' = \dot{E}_1$$

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

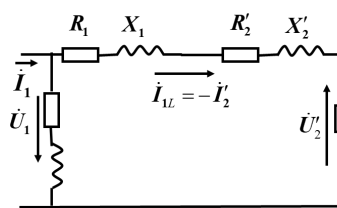
$$\dot{U}_2' = \dot{I}_2' Z_L'$$

折算后方程及等效电路

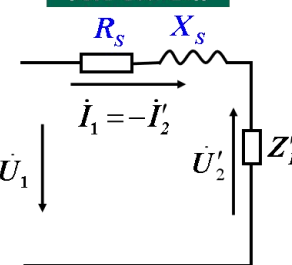
T型等效电路:



近似等效电路



简化等效电路



其中

$$R_s = R_1 + R_2'$$

$$X_s = X_1 + X_2'$$

$$Z_s = R_s + jX_s$$

分别称为短路电阻、短路电抗和短路阻抗。