

第二章 变压器的运行分析

§ 2-1 变压器各电磁量正方向

§ 2-2 变压器的空载运行

§ 2-3 变压器的负载运行

§ 2-4 标么值

§ 2-5 变压器参数的测定

§ 2-6 变压器的运行性能

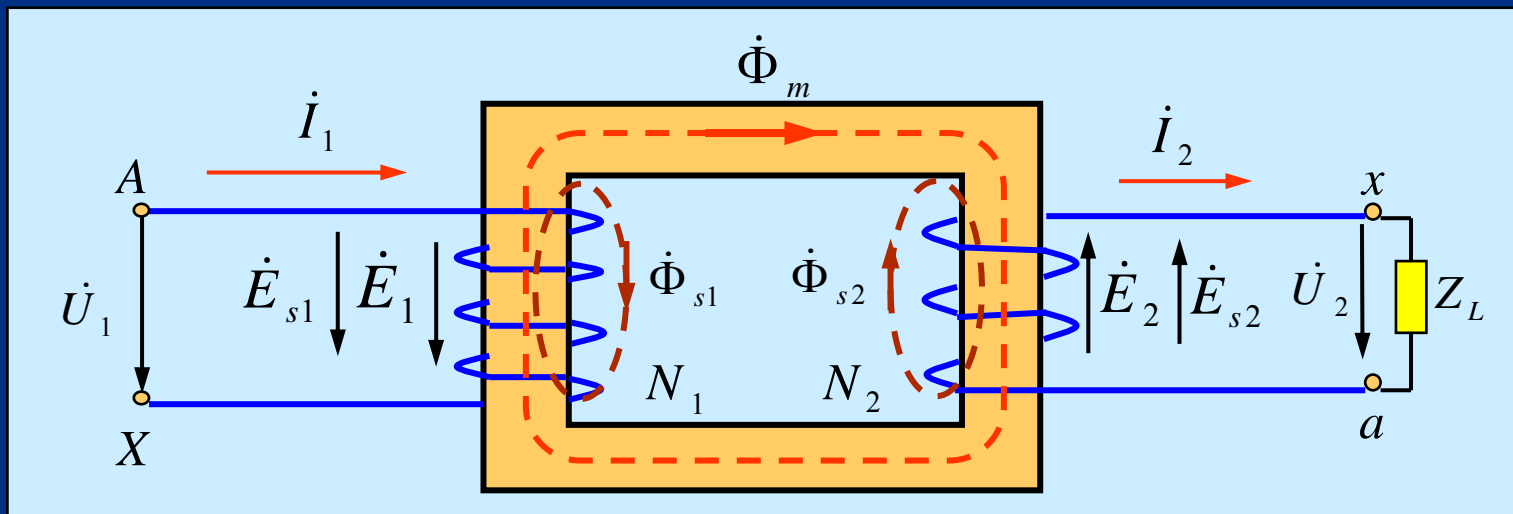
小 结

第二章 变压器的运行分析

★基本要求:

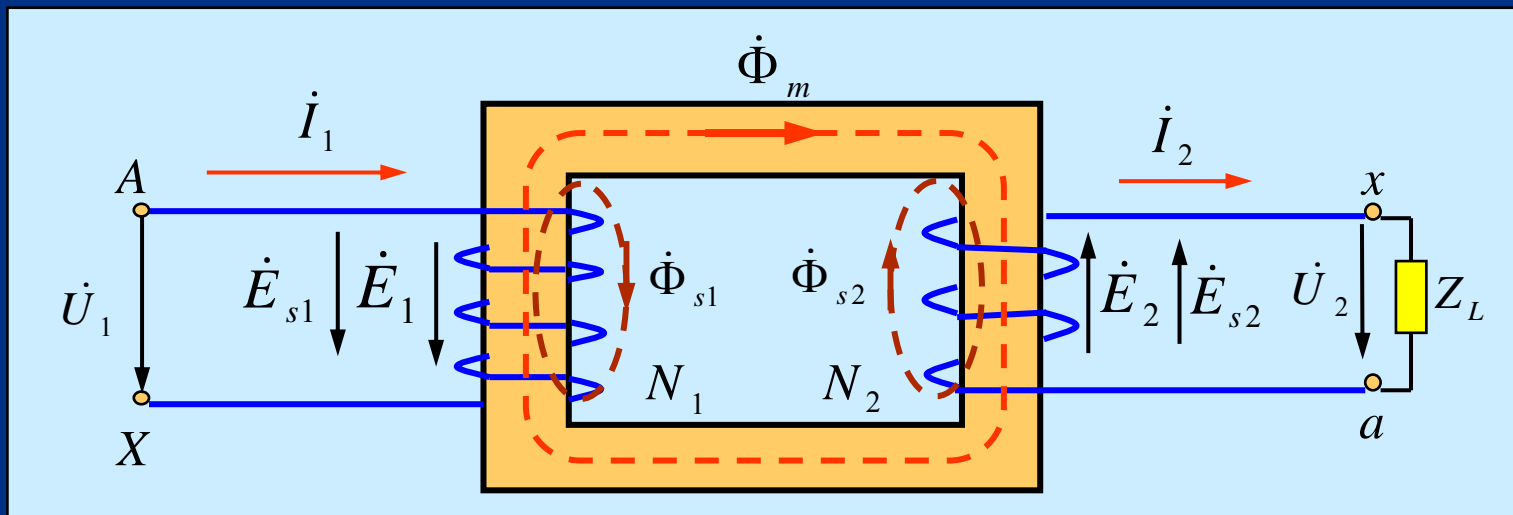
1. 掌握变压器的基本工作原理，熟练应用感应电势公式
2. 掌握变压器绕组的折算方法
3. 掌握分析变压器的基本方法—变压器的基本方程式、等值电路和相量图
4. 掌握变压器等值电路参数的测定方法
5. 掌握变压器的运行性能指标计算方法

§ 2-1 变压器各电磁量的正方向



1. 一次侧电流和电压正方向按电动机惯例，从端点向变压器看两者方向一致。
2. 磁通和电流正方向符合右手螺旋关系
3. 电势和磁通正方向符合右手螺旋关系
4. 二次侧电流和电压正方向按发电机惯例，从端点向变压器看两者方向相反。
5. 负载端的电压和电流正方向一致

§ 2-1 变压器各电磁量的正方向



说明：磁通的正方向与产生它的电流的正方向符合右手螺旋关系，电动势的正方向与感应它的磁通的正方向也符合右手螺旋关系，所以电流正方向与感应电势正方向一致。

\dot{E}_1 、 \dot{E}_{s1} 和 \dot{I}_1 的正方向一致 \dot{E}_2 、 \dot{E}_{s2} 和 \dot{I}_2 的正方向一致

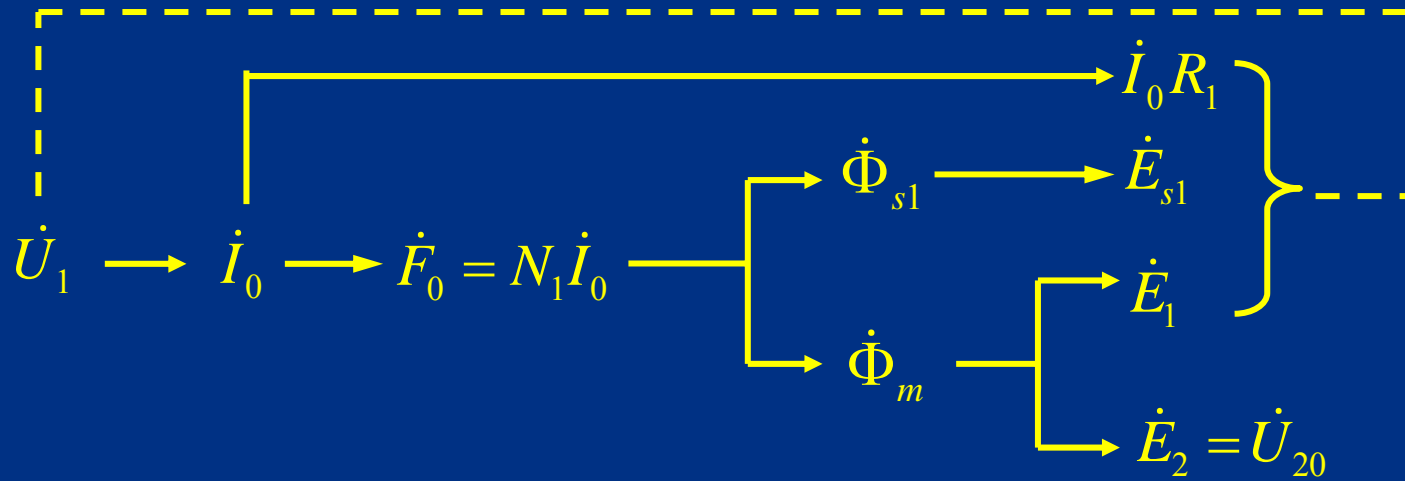
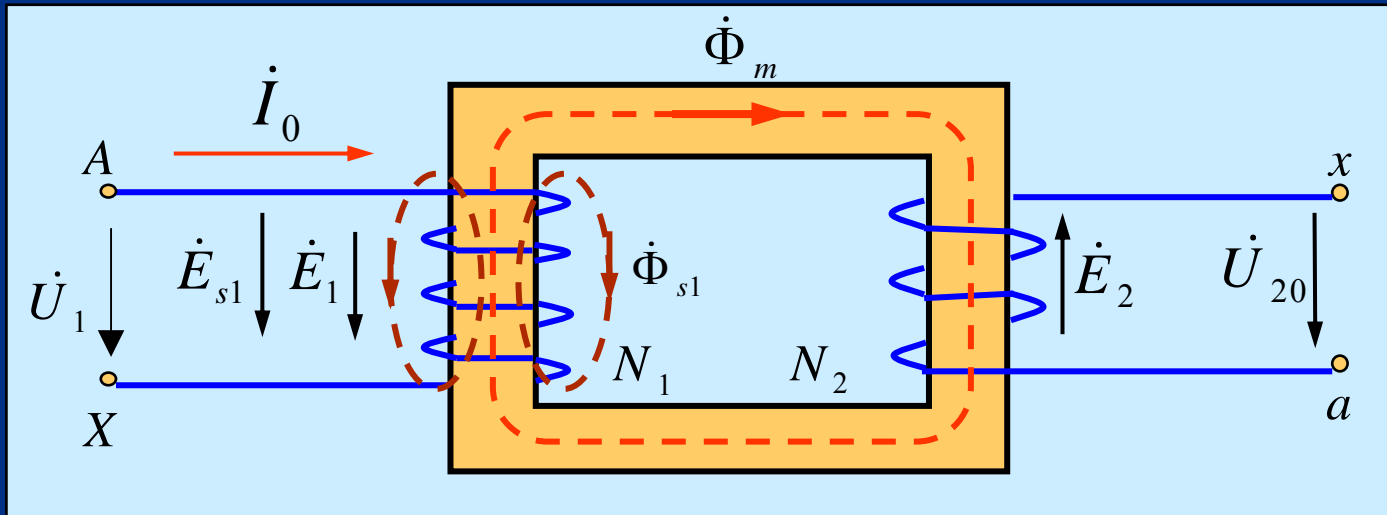
§ 2-2 变压器的空载运行

变压器空载运行是指变压器的一次绕组接额定电压、额定频率的交流电源而二次绕组开路时的运行状态。

1. 变压器空载运行时的电磁过程
2. 感应电动势
3. 变压器空载运行时的电压方程式
4. 激磁电流的组成
5. 变压器空载运行时的等效电路和相量图

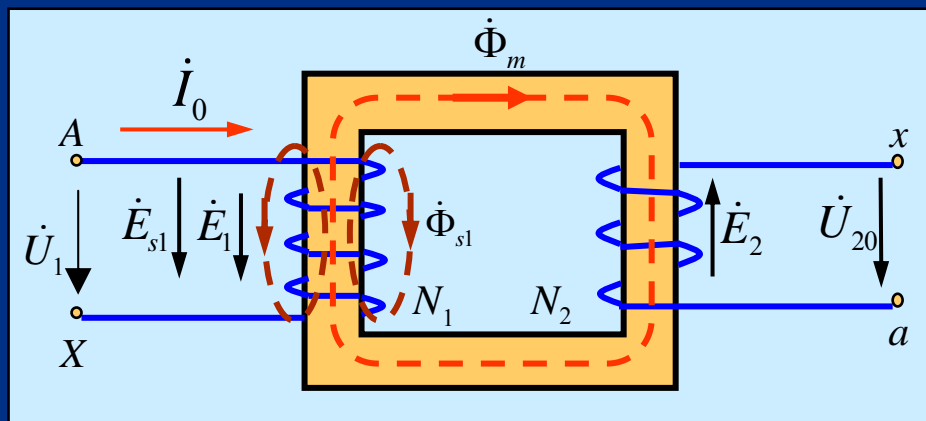
1. 变压器空载运行时的电磁过程

1.1 电磁过程



1.2 主磁通和漏磁通

1) **主磁通**：沿铁心闭合，同时与一、二次绕组相交链的磁通称为主磁通，用 Φ_m 表示。

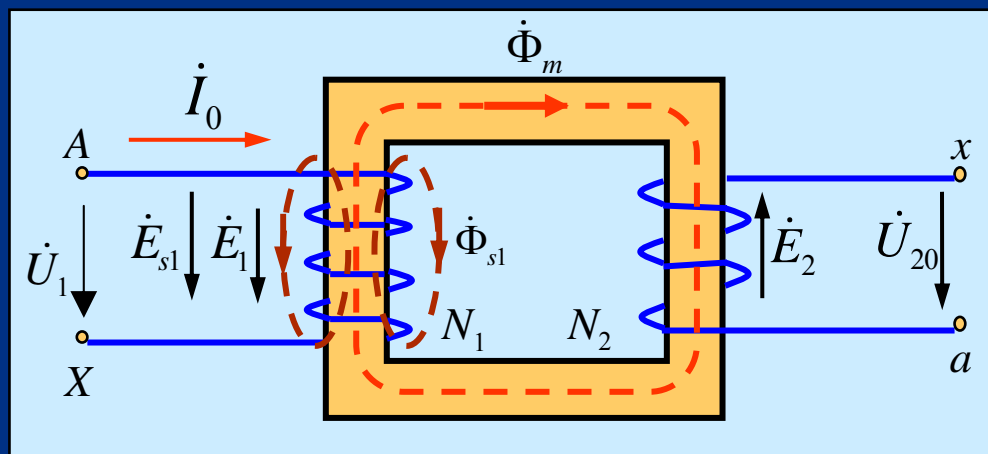


2) **漏磁通**：主要以空气或变压器油等非铁磁材料构成回路，仅与一次绕组（或二次绕组）相交链的磁通称为一次绕组（或二次绕组）的漏磁通，简称为一次（或二次）漏磁通，用 Φ_{s1} （或 Φ_{s2} ）表示。

注意： * Φ_m 、 Φ_{s1} 都是最大值；

* Φ_m 、 Φ_{s1} 都是由同一激磁磁动势 F_0 产生的。

1.2 主磁通和漏磁通



3) 主磁通和漏磁通的区别

- 性质上: Φ_m 与 I_0 呈非线性关系, Φ_{s1} 与 I_0 呈线性关系;
- 数量上: Φ_m 占总磁通绝大部分, Φ_{s1} 不足总磁通的10%;
- 作用上: Φ_m 起传递能量的作用, Φ_{s1} 起漏抗压降作用。

2. 感应电动势

2.1 主磁通感应电动势

1) 一次绕组感应电动势

$$\phi = \Phi_m \sin \omega t$$

$$\rightarrow e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} = 2\pi f N_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

有效值 $E_1 = \sqrt{2} \pi f N_1 \Phi_m$

取 $\dot{\Phi}_m = \Phi_m \angle 0$ 为参考向量，因 \dot{E}_1 滞后主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 90° ，

则相量 $\dot{E}_1 = -j\sqrt{2}\pi f N_1 \dot{\Phi}_m$

2.1 主磁通感应电动势

2) 二次绕组感应电动势

有效值 $E_2 = \sqrt{2}\pi f N_2 \Phi_m$

相量 $\dot{E}_2 = -j\sqrt{2}\pi f N_2 \dot{\Phi}_m$

3) 结论

- $E_1 \propto f N_1 \Phi_m, E_2 \propto f N_2 \Phi_m$
- 在时间相位上, \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 都滞后 $\dot{\Phi}_m 90^\circ$

2.2 漏磁通感应电动势

$$\left. \begin{aligned} e_{s1} &= -\frac{d\psi_{s1}}{dt} = -N_1 \frac{d\phi_{s1}}{dt} \\ \psi_{s1} &= L_{s1} i_0 \\ i_0 &= \sqrt{2} I_0 \sin \omega t \end{aligned} \right\} \Rightarrow e_{s1} = \sqrt{2} \omega L_{s1} I_0 \sin(\omega t - 90^\circ)$$

相量 $\dot{E}_{s1} = -j\omega L_{s1} \dot{I}_0 = -j\dot{I}_0 X_1$

式中, $L_{s1} = N_1^2 \Lambda_{s1}$ 称为一次绕组的漏电感;

$X_1 = \omega L_{s1} = \omega N_1^2 \Lambda_{s1}$ 称为一次绕组的漏电抗。

2.2 漏磁通感应电动势

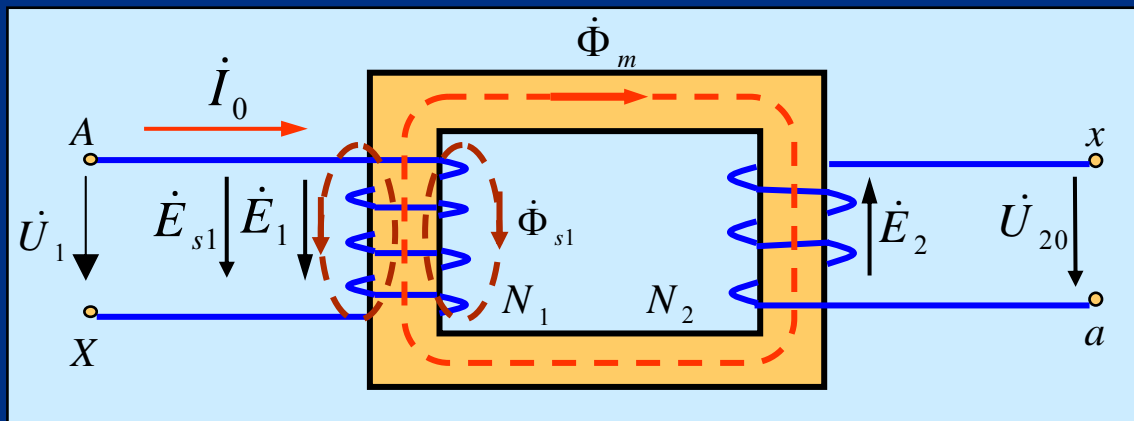
$$\dot{E}_{s1} = -j\omega L_{s1} \dot{I}_0 = -j\dot{I}_0 X_1$$

式中， $L_{s1} = N_1^2 \Lambda_{s1}$ 称为一次绕组的漏电感；

$X_1 = \omega L_{s1} = \omega N_1^2 \Lambda_{s1}$ 称为一次绕组的漏电抗。

- ❖ 漏磁通感应电动势可以看成在漏电抗 X_1 上的压降形式。
- ❖ 由于漏磁通主要经过非铁磁路径，磁路不饱和，所以漏电抗 X_1 很小且为常数，它不随电源电压负载情况而变。

3. 变压器空载运行时的电压方程式



3.1 一次绕组回路的电压方程式

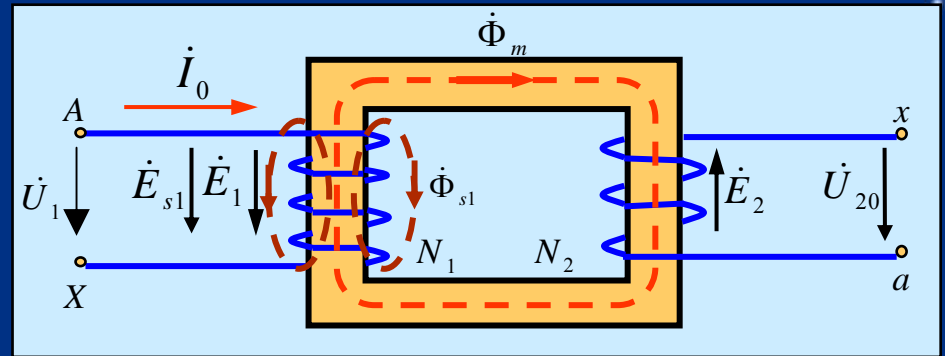
$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0(R_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1$$

式中， R_1 为一次绕组的电阻；

$Z_1 = R_1 + jX_1$ 为一次绕组的漏阻抗。

3.2 二次绕组回路的电压方程式

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2$$



3.3 变压器的变比

- 1) 定义：变压器的一次电动势与二次电动势之比，称为变压器的变比，用 k 表示，即

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

- 2) 计算

$$k = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}$$

3.3 变压器的变比

3) 三相变压器的变比：三相变压器的变比是指其一、二次相电动势之比，即

$$k = \frac{E_{1\phi}}{E_{2\phi}} \approx \frac{U_{1N\phi}}{U_{2N\phi}}$$

Yd接线

$$k = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}U_{2N}}$$

Dy接线

$$k = \frac{\sqrt{3}U_{1N}}{U_{2N}}$$

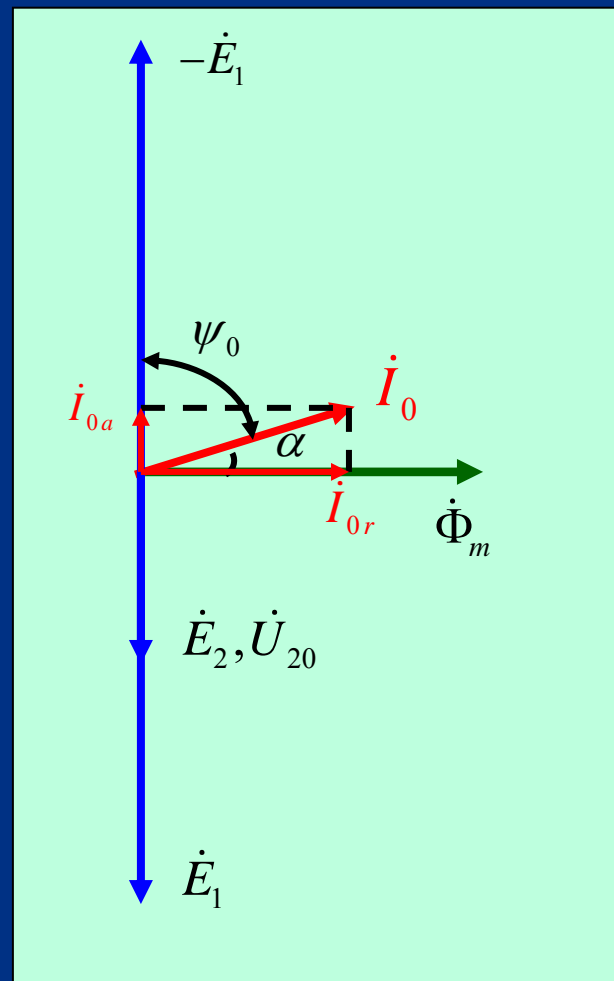
4 激磁电流的组成

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{0a} + \dot{I}_{0r}$$

式中， \dot{I}_{0r} ——磁化分量，建立磁场，产生主磁通，无功分量；

\dot{I}_{0a} ——铁耗分量，供给变压器铁心损耗，有功分量。

$$\begin{cases} I_{0a} = I_0 \cos \psi_0 \\ I_{0r} = I_0 \sin \psi_0 \\ I_0 = \sqrt{I_{0r}^2 + I_{0a}^2} \end{cases}$$



变压器空载时各物理量的相位关系

5. 变压器空载运行时的等效电路和相量图

5.1 变压器空载运行时的等效电路

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0(R_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1$$

$$\dot{E}_1 = -j\sqrt{2}\pi f N_1 \dot{\Phi}_m$$

$$\dot{E}_{s1} = -j\dot{I}_0 X_1$$

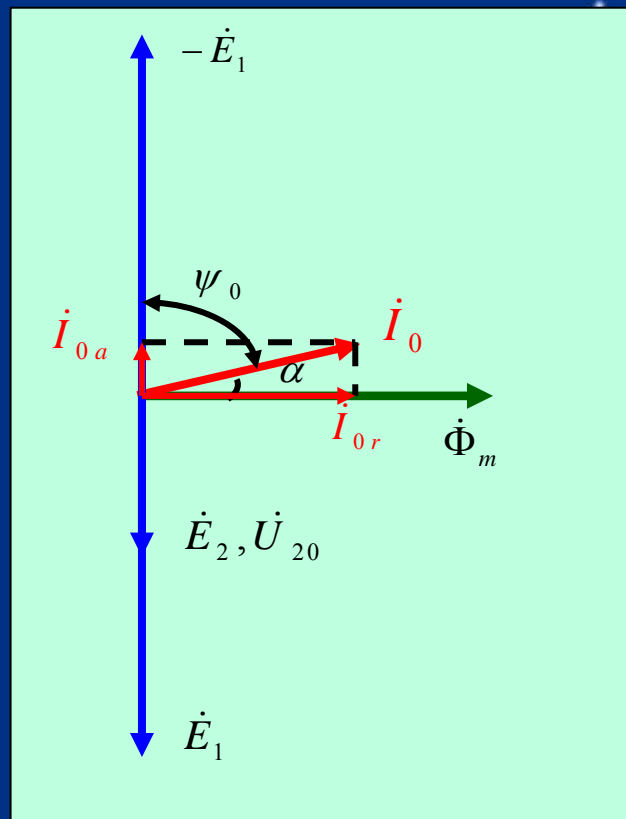
$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0(R_m + jX_m) = \dot{I}_0 Z_m$$

式中，

R_m —激磁电阻，表征铁心损耗的一个等效参数；

X_m —激磁电抗，表征铁心的磁化性能的一个等效参数；

Z_m —激磁阻抗。

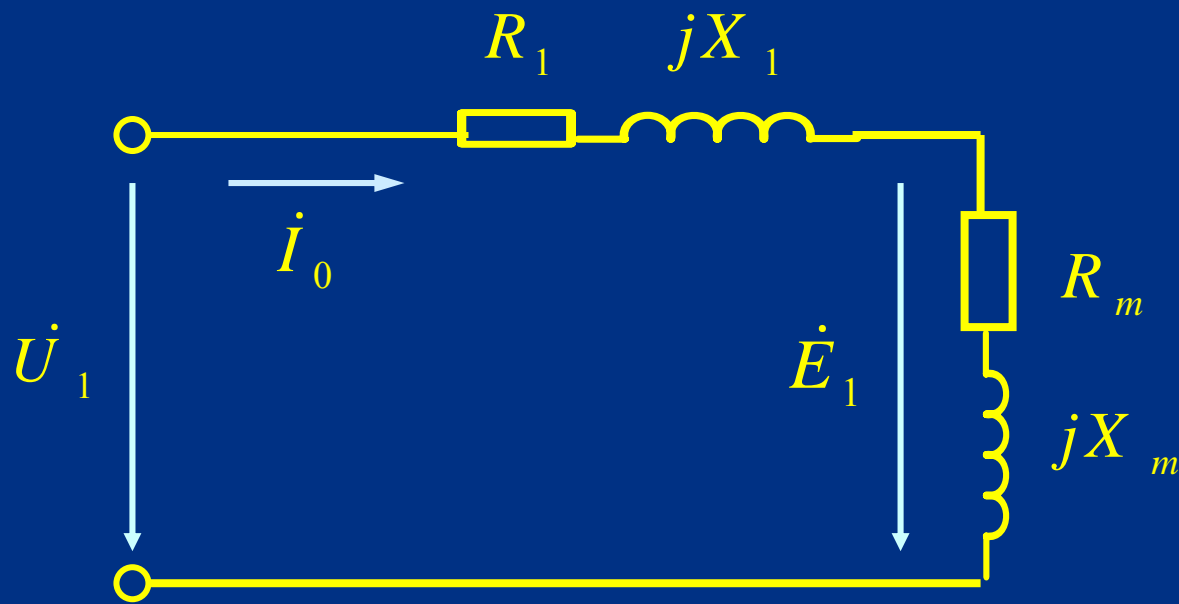


5.1 变压器空载运行时的等效电路

一次侧的电动势平衡方程式为

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 = \dot{I}_0 Z_m + \dot{I}_0 Z_1 \\ &= \dot{I}_0 (R_m + jX_m) + \dot{I}_0 (R_1 + jX_1)\end{aligned}$$

变压器空载运行时的等效电路为



5.1 变压器空载运行时的等效电路

说明:

- ❖ 激磁电阻 R_m 不是一个实际存在的电阻，它是一个反映铁耗的等效电阻。
- ❖ 激磁电抗 X_m 反映了主磁通对电路的电磁效应，是与主磁通对应的电抗。其大小 $X_m = 2\pi f N_1^2 \Lambda_m$ ， Λ_m 为主磁通 ϕ 所经路径的磁导。
- ❖ R_m 和 X_m 与磁路的饱和程度有关，都是变量， R_m 和 X_m 随外加电压 U_1 的升高而减小。变压器在正常运行时，电源电压变动范围不大， R_m 和 X_m 可视为常数。
- ❖ X_1 是与一次绕组漏磁通对应的电抗，为一常数。

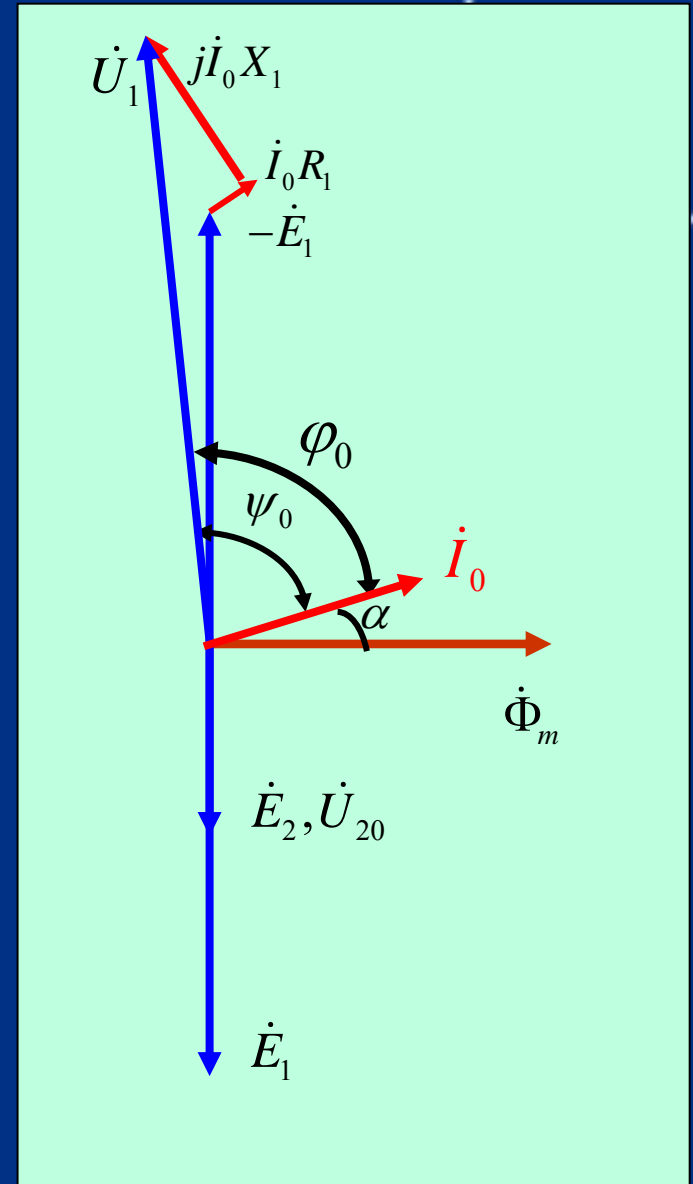
5.2 变压器空载运行时的相量图

$$\dot{E}_1 = -j\sqrt{2}\pi f N_1 \dot{\Phi}_m$$

$$\dot{E}_2 = -j\sqrt{2}\pi f N_2 \dot{\Phi}_m$$

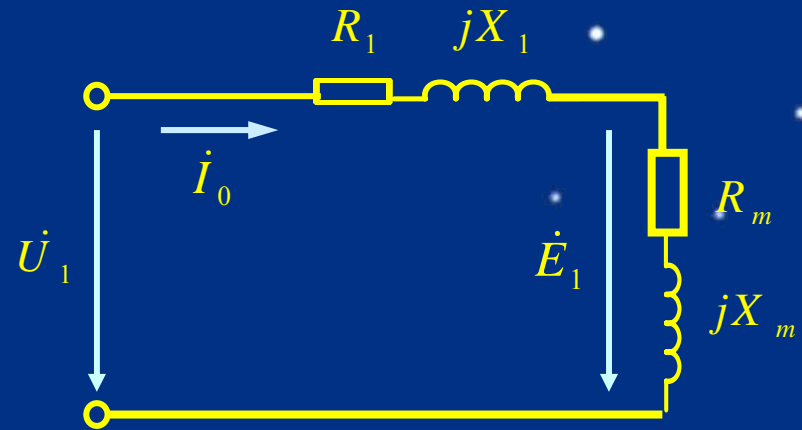
$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 (R_1 + jX_1)\end{aligned}$$



5.3 变压器的空载损耗

因为空载功率因数很小，所以变压器空载运行时从电源吸收很大的滞后性无功功率。从电源吸收少量的有功功率，用来供给铁耗和一次绕组的铜耗。



$$P_0 = p_{Fe} + p_{Cu1} = p_{Fe} + I_0^2 R_1 \approx p_{Fe}$$

作业:

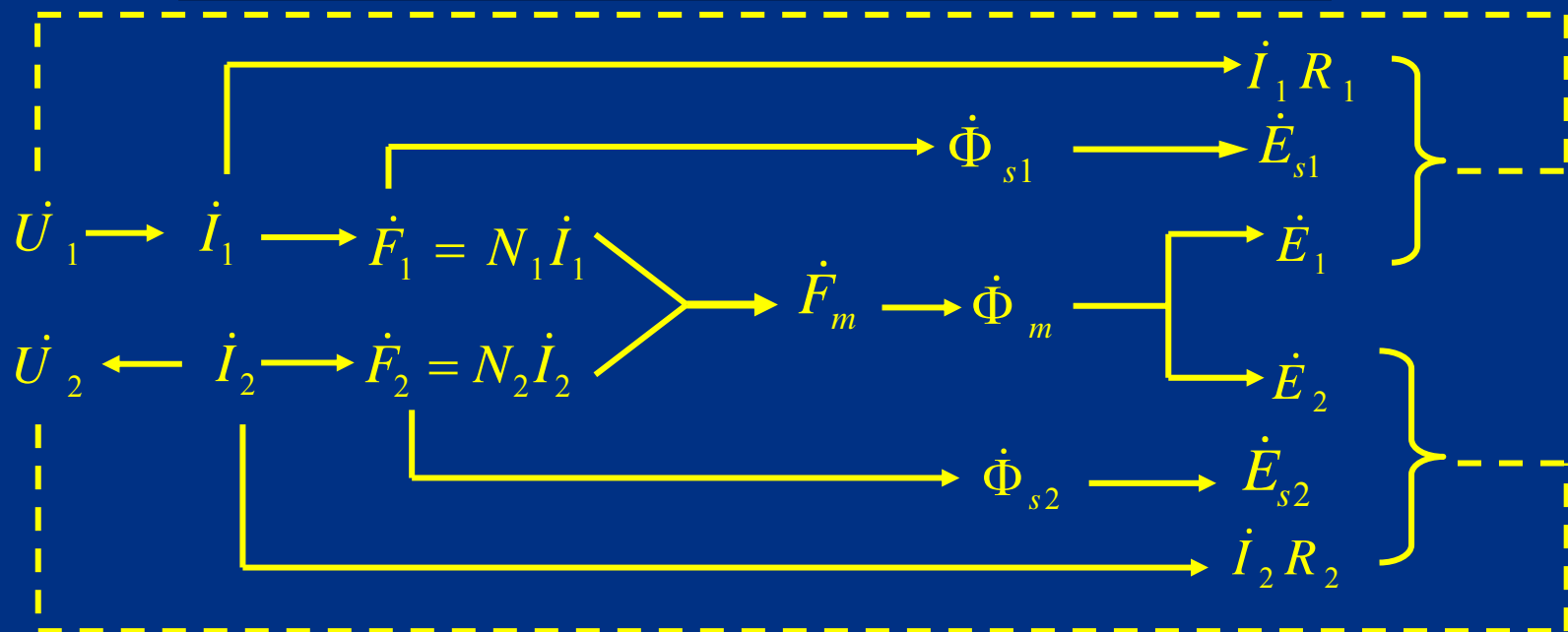
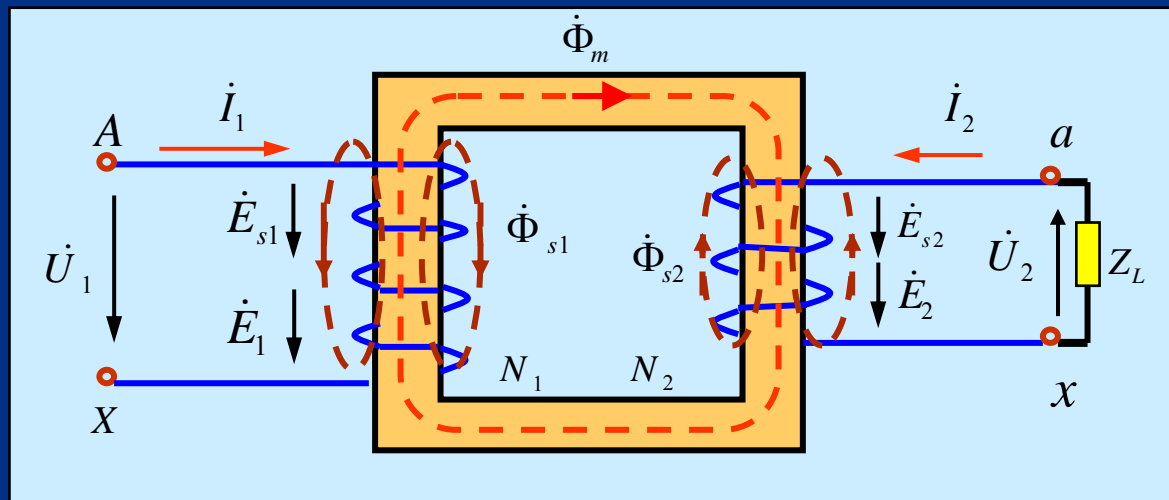
P45习题2-1 2-2

§ 2-3 变压器的负载运行

变压器的负载运行：变压器的一次绕组接电源，二次绕组接负载的运行状态。

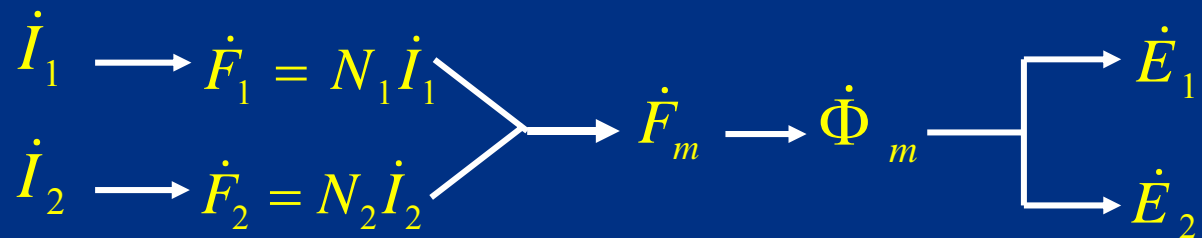
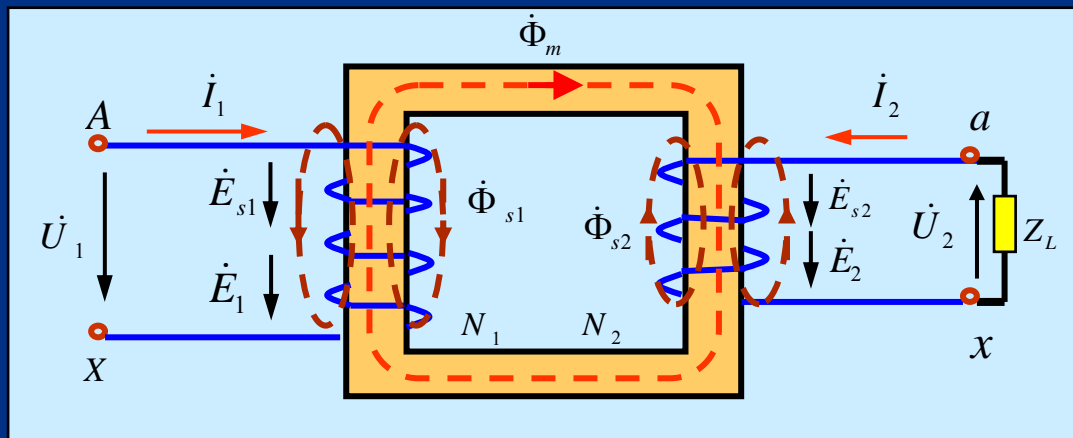
1. 变压器负载运行时的电磁过程
2. 变压器的基本方程式
3. 绕组的折算
4. 负载时的等效电路
5. 负载时的相量图

1. 变压器负载运行时的电磁过程



2. 变压器的基本方程式

2.1 磁势平衡方程式



负载时的激磁磁势 $\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_m$

2.1 磁势平衡方程式

空载时，一次回路

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \\ I_0 Z_1 &\ll E_1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$$

负载时，一次回路

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ I_1 Z_1 &\ll E_1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$$

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m$$

结论： 电力变压器负载运行时的主磁通近似等于空载时的主磁通，所以产生 $\dot{\Phi}_m$ 的合成磁势 \dot{F}_m 与空载磁势 \dot{F}_0 近似相等，负载时的激磁电流 \dot{I}_m 与空载电流 \dot{I}_0 也近似相等。

2.1 磁势平衡方程式

空载时的激磁磁势 $\dot{F}_0 = N_1 \dot{I}_0$

负载时的激磁磁势 $\dot{F}_m = N_1 \dot{I}_m = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 = N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2$

磁势平衡方程式 $\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_m$

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

用电流形式表示 $\dot{I}_1 + \frac{\dot{I}_2}{k} = \dot{I}_m$

$$\longrightarrow \dot{I}_1 = \dot{I}_m + \left(-\frac{\dot{I}_2}{k} \right) = \dot{I}_m + \dot{I}_{1L}$$

2.1 磁势平衡方程式

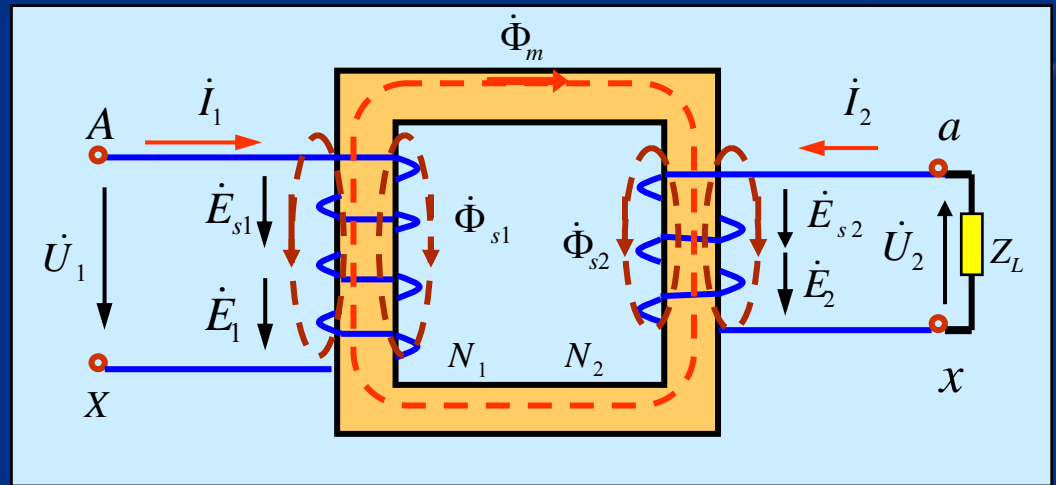
$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + \left(-\frac{\dot{I}_2}{k} \right) = \dot{I}_m + \dot{I}_{1L}$$

式中, $k = \frac{N_1}{N_2}$ ——变压器变比

\dot{I}_{1L} ——一次电流的负载分量

负载运行时, 变压器的一次电流分成两个分量, 一个是激磁电流 \dot{I}_m , 用来建立主磁通; 另一个是负载分量 $\dot{I}_{1L} = -\frac{\dot{I}_2}{k}$, 用来建立磁势 $N_1 \dot{I}_{1L}$ 抵消二次磁动势 $N_2 \dot{I}_2$ 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。

2.2 电势平衡方程式



根据Kirchhoff电压定律，可写出一、二次侧的电动势平衡方程式

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(R_2 + jX_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L = \dot{I}_2(R_L + jX_L)$$

2.3 变压器稳态运行时的基本方程式

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

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

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

$$\dot{I}_1 + \frac{\dot{I}_2}{k} = \dot{I}_m$$

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

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

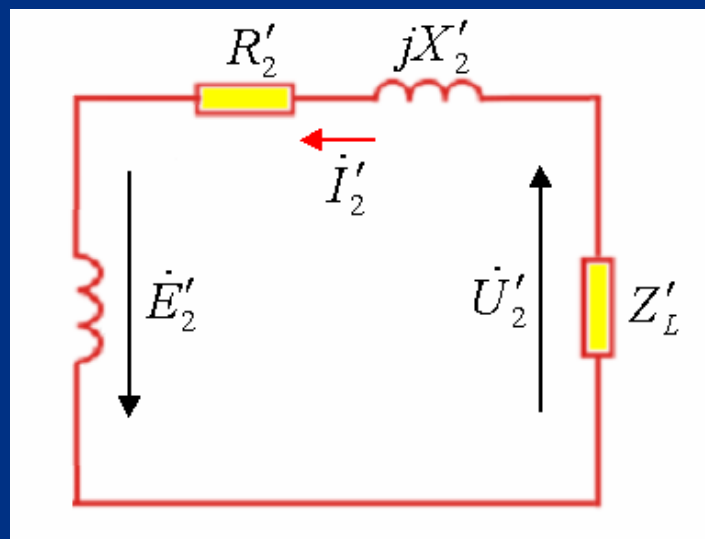
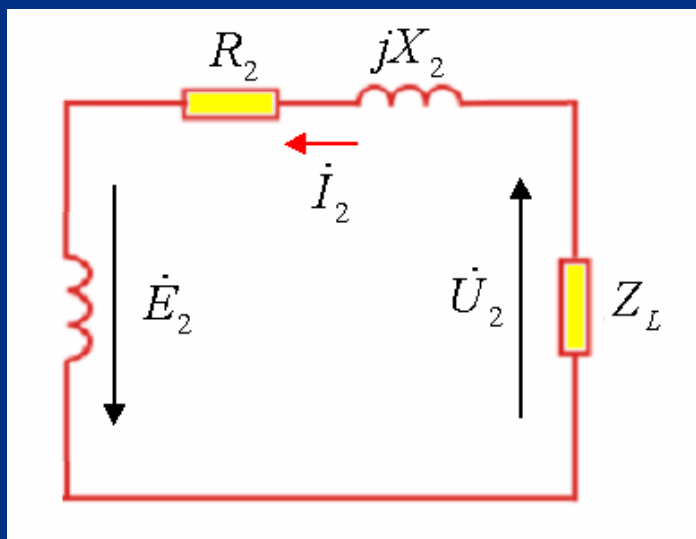
已知： U_1 ，变压器变比 k ，变压器参数 Z_1 、 Z_2 、 Z_m 及负载阻抗 Z_L ，
可求出六个未知量： \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 、 \dot{I}_m 、 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 、 \dot{U}_2 。

3. 绕组的折算

- **折算方法：** 保持一个绕组的磁动势不变而改变其电流和匝数的算法称为折合算法，简称为折算法。
- **折算的目的：** 用一个等效的电路代替实际的变压器，以便于计算。
- **折算原则：** 1) 折算前后二次侧磁势不变； 2) 折算前后二次侧的各种功率和损耗不变、即能量传递关系不变。
- **折算后变量符号：** 右上角打“' ”表示。

3. 绕组的折算

- 二次侧折算到一次侧：保持一次绕组匝数 N_1 不变。设想有一个匝数为 $N_2' = N_1$ 的二次绕组，用它来取代原有匝数为 N_2 的二次绕组，使变比 $k = N_1/N_2' = 1$ 。



3. 绕组的折算

•各物理量的折算方法：（将二次侧折算到一次侧）

1) 电流

$$N_1 \dot{I}'_2 = N_2 \dot{I}_2$$

$$\longrightarrow \dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{k}$$

磁势平衡方程式的电流表达形式：

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

3. 绕组的折算

• 各物理量的折算方法:

2) 电动势

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}'_2 &= -j4.44 fN_1 \dot{\Phi}_m \\ \dot{E}_2 &= -j4.44 fN_2 \dot{\Phi}_m \end{aligned} \right\} \longrightarrow \dot{E}'_2 = k\dot{E}_2 = \dot{E}_1$$

3) 阻抗

$$\left. \begin{aligned} R'_2 &= k^2 R_2 \\ X'_2 &= k^2 X_2 \end{aligned} \right\} \longrightarrow Z'_2 = R'_2 + jX'_2 = k^2 Z_2$$

3. 绕组的折算

• 各物理量的折算方法:

3) 阻抗

$$R'_L = k^2 R_L$$

$$X'_L = k^2 X_L$$

$$Z'_L = R'_L + jX'_L = k^2 Z_L$$



4) 负载电压

$$\dot{U}'_2 = k \dot{U}_2$$

4. 负载时的等效电路

折算后的基本方程式为：

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

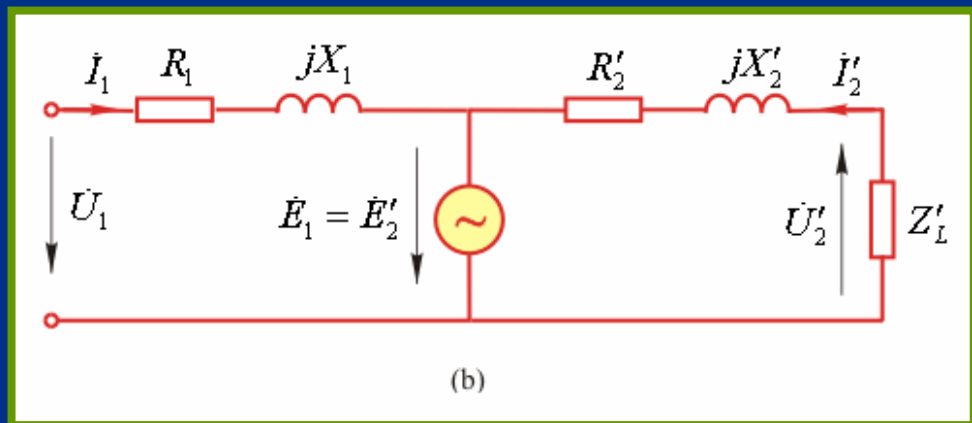
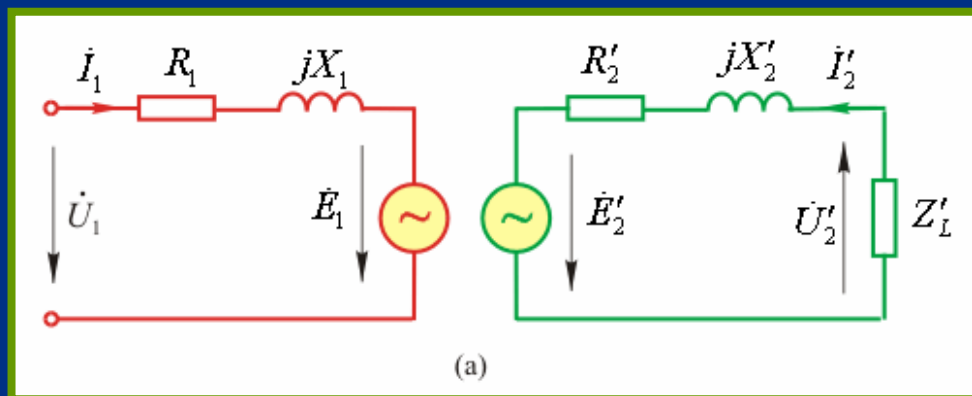
$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2$$

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

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

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

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



4.1 变压器的T型等效电路

4.1 变压器的T型等效电路

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

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2$$

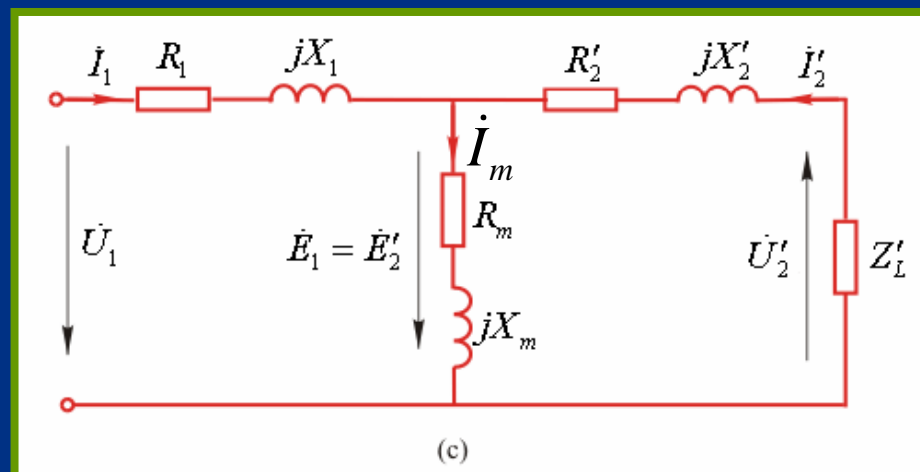
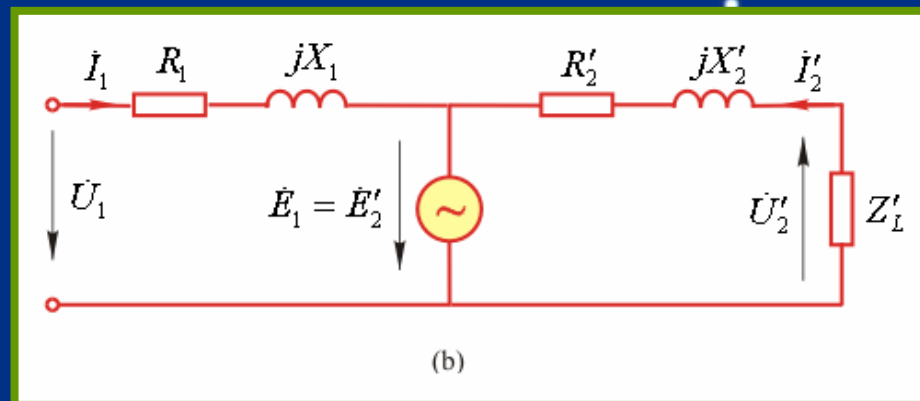
$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$$

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

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

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

T型等效电路能准确地反映变压器运行时的物理情况。

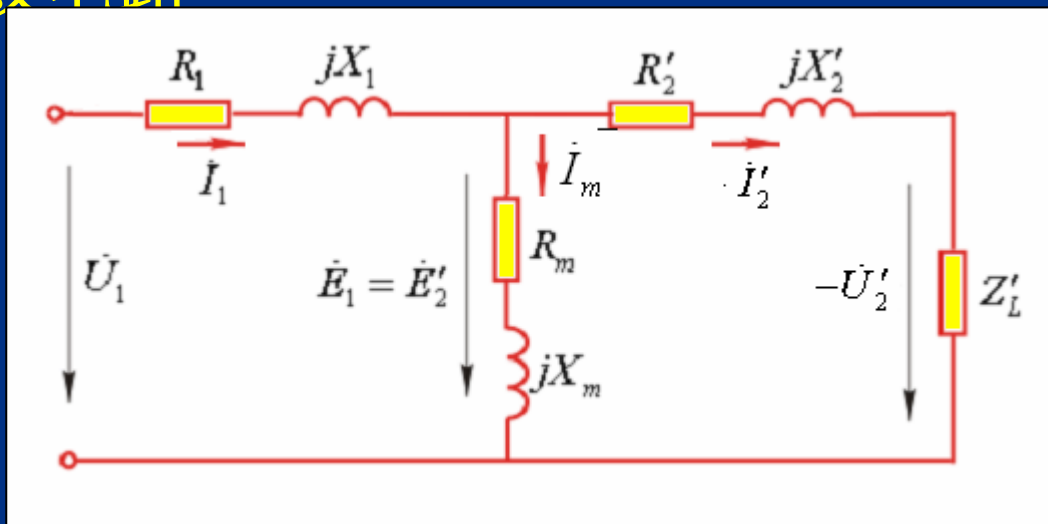


变压器的T型等效电路

4.1 变压器的T型等效电路

$$\text{令 } \dot{U}_1 = U_1 \angle 0^\circ,$$

由“T”型等效电路可得:



$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_m \parallel (Z_2' + Z_L')} = I_1 \angle -\varphi_1$$

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

$$\dot{I}_m = \dot{I}_1 \cdot \frac{Z_2' + Z_L'}{Z_m + (Z_2' + Z_L')}$$

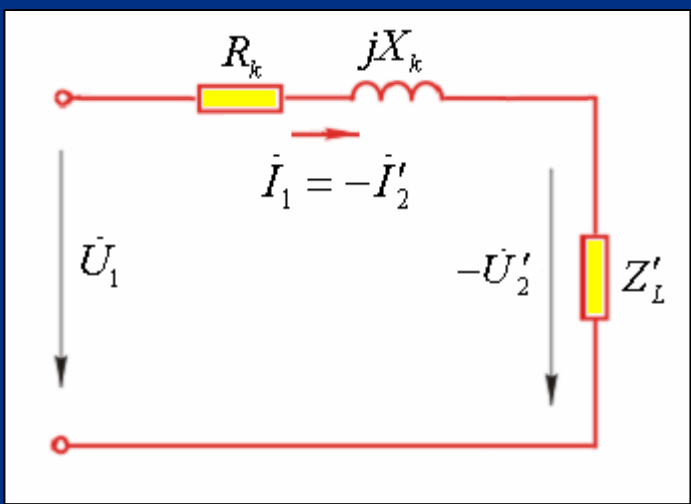
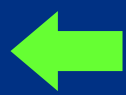
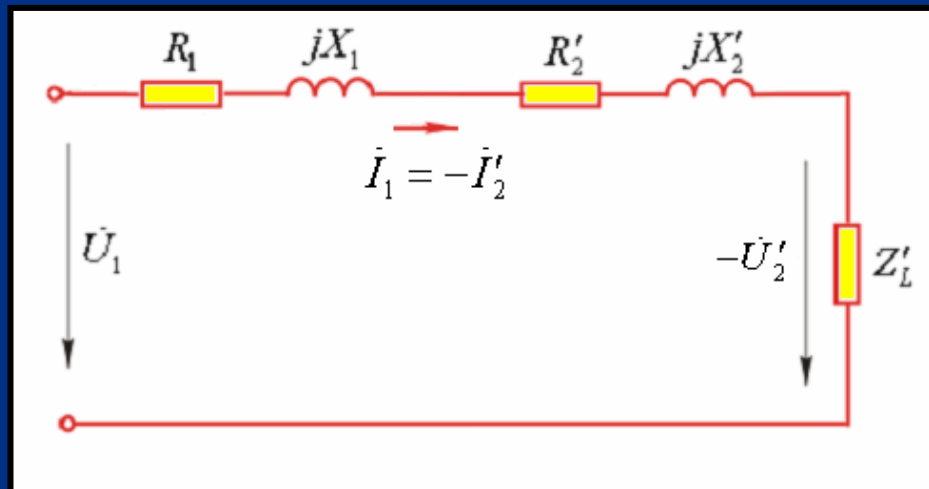
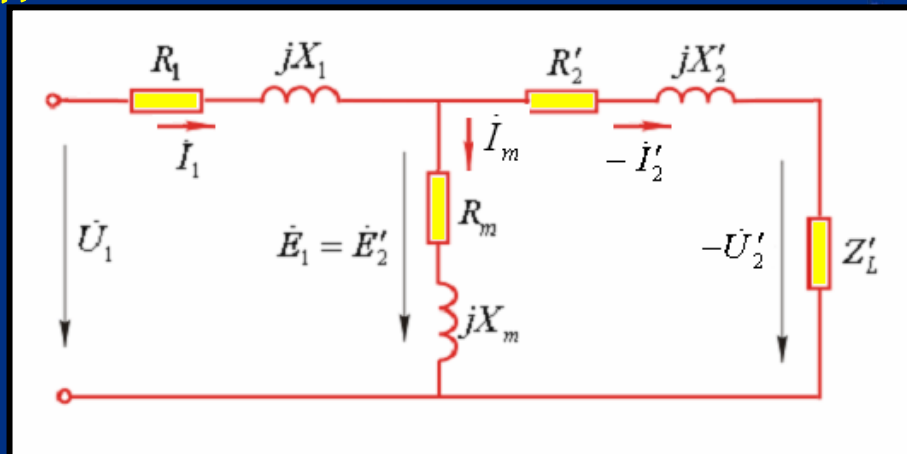
$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$$

$$-\dot{I}_2' = \dot{I}_1 \cdot \frac{Z_m}{Z_m + (Z_2' + Z_L')}$$

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

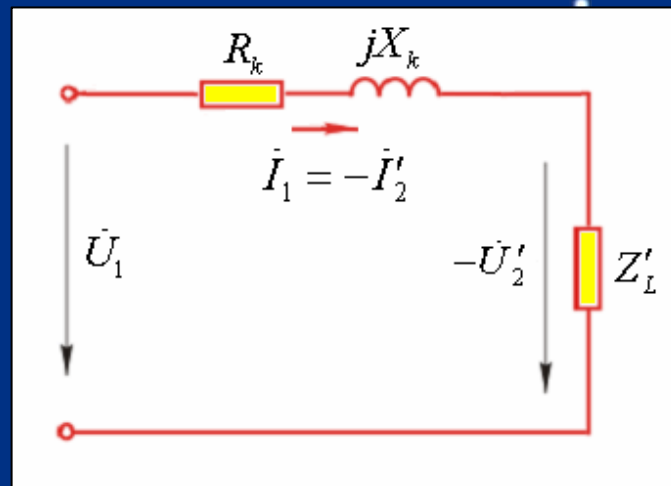
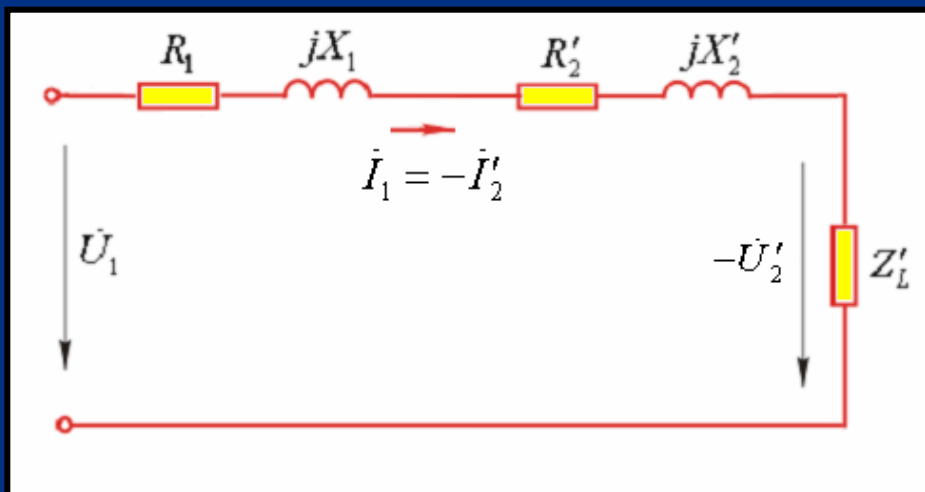
4.2 变压器的简化等效电路

在电力变压器中， $I_m \ll I_{1N}$ ，因此，在工程计算中当变压器满载或负载电流较大时可忽略 I_m ，将激磁支路断开，从而得到变压器的简化等效电路。



变压器的简化等效电路

4.2 变压器的简化等效电路



$$R_k = R_1 + R'_2 = R_1 + k^2 R_2$$

$$X_k = X_1 + X'_2 = X_1 + k^2 X_2$$

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

式中， Z_k -变压器的短路阻抗

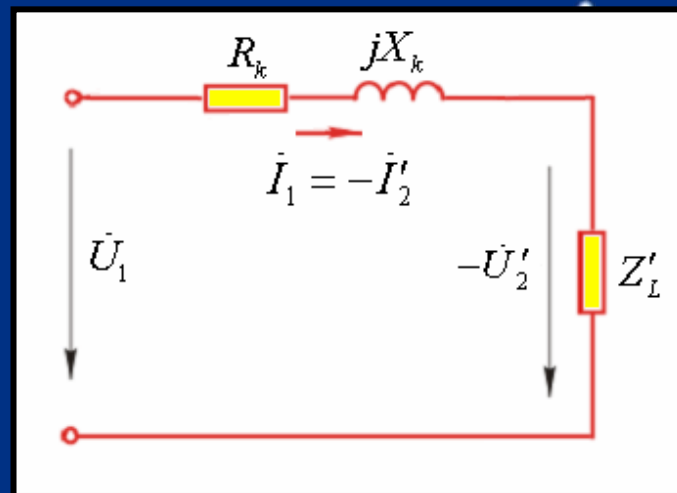
R_k -变压器的短路电阻

X_k -变压器的短路电抗

4.2 变压器的简化等效电路

电压方程式

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{U}'_2 + \dot{I}_1 Z_k \\ &= -\dot{U}'_2 + \dot{I}_1 R_k + j\dot{I}_1 X_k\end{aligned}$$



说明：

- 变压器的简化等效电路不适用于空载运行，适用于正常负载运行和稳态短路。
- 一般情况下，当没给激磁阻抗 Z_m ，只给短路阻抗 Z_k 时就采用简化等效电路。

5. 负载时的相量图

5.1 与T型等效电路对应的相量图

已知: U_2 、 I_2 、 $\cos\varphi_2$ 及变压器的参数 k 、 R_1 、 X_1 、 R_2' 、 X_2' 、 R_m 、 X_m

要求: 画出变压器的相量图。 ($\varphi_2 > 0$)

$$\dot{E}_2' = \dot{U}_2' + \dot{I}_2' Z_2'$$

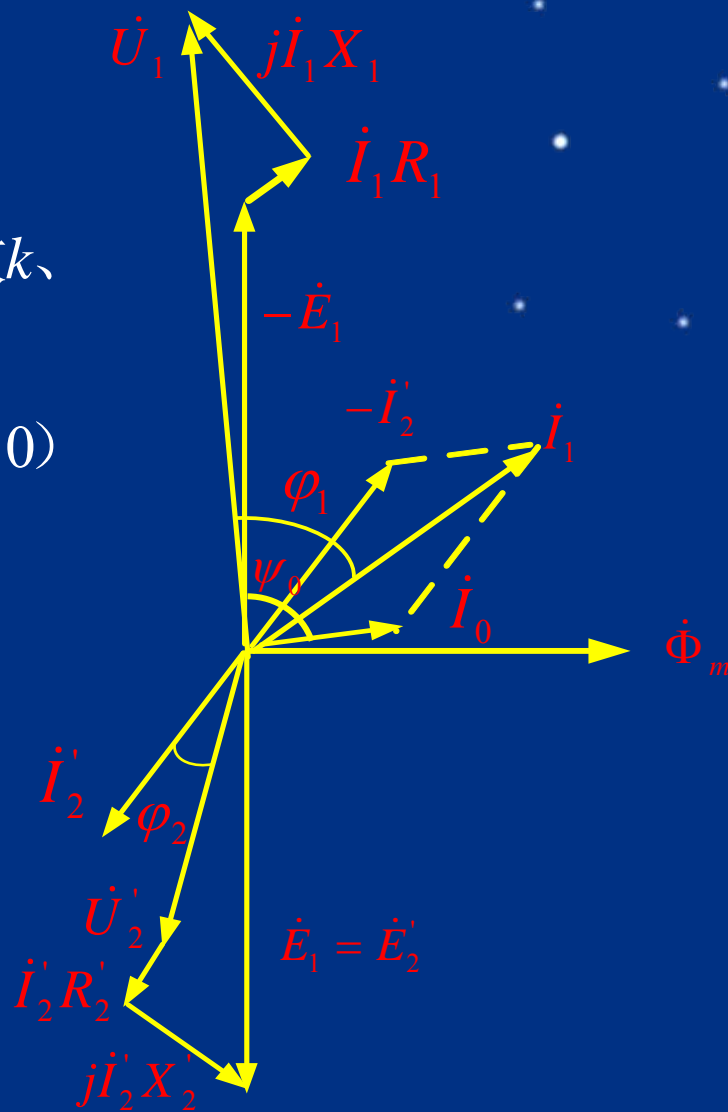
$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$$

$$\dot{I}_m = -\dot{E}_1 / Z_m$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}_2')$$

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

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



5. 负载时的相量图

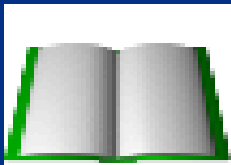
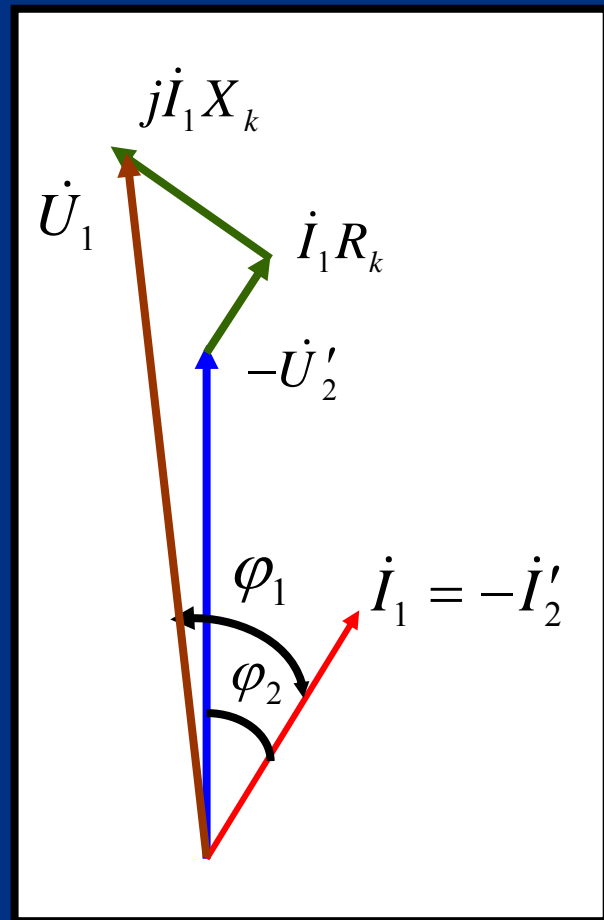
5.2 与简化等效电路对应的相量图

已知： U_2' 、 I_2' 、 $\cos\varphi_2$ 及变压器的参数 R_k 、 X_k

要求：画出变压器的相量图。（ $\varphi_2 > 0$ ）

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2'$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{U}_2' + \dot{I}_1 Z_k \\ &= -\dot{U}_2' + \dot{I}_1 R_k + j\dot{I}_1 X_k\end{aligned}$$



【例题 2-1】

§ 2-4 标么值

★基本要求：掌握标么值的概念及应用方法

1. 标么值的概念

$$\text{标么值} = \frac{\text{某物理量的实际值}}{\text{该物理量的基值（与实际值同单位）}}$$

标么值用下划线“_”或右上角打“*”表示。

2. 基值的选取

2.1 基值选取的原则

在简化计算的同时要保持各物理量的标么值之间的关系式与各物理量实际值之间的关系式的一致性。

2.2 基值的选取方法

取额定值作为基值

- 电压基值：额定电压 U_{1N} U_{2N}
- 电流基值：额定电流 I_{1N} I_{2N}
- 功率基值：额定容量 S_N
- 阻抗基值：额定相电压与额定相电流之比

$$Z_{1N} = \frac{U_{1N\phi}}{I_{1N\phi}} \quad Z_{2N} = \frac{U_{2N\phi}}{I_{2N\phi}}$$

★三相变压器：线值以额定线值为基值，相值以额定相值为基值。

2.2 基值的选取方法

	一次侧	二次侧
功率	S_N	S_N
线电压	U_{1N}	U_{2N}
相电压	$U_{1N\phi}$	$U_{2N\phi}$
线电流	I_{1N}	I_{2N}
相电流	$I_{1N\phi}$	$I_{2N\phi}$
阻抗	$Z_{1N} = \frac{U_{1N\phi}}{I_{1N\phi}}$	$Z_{2N} = \frac{U_{2N\phi}}{I_{2N\phi}}$

3. 变压器的标么值

1) 电压 $\underline{U}_1 = \frac{U_1}{U_{1N}}$ $\underline{U}_2 = \frac{U_2}{U_{2N}}$

2) 电流 $\underline{I}_1 = \frac{I_1}{I_{1N}}$ $\underline{I}_2 = \frac{I_2}{I_{2N}}$

3) 阻抗 $\underline{Z}_1 = \frac{I_{1N}\phi Z_1}{U_{1N}\phi}$ $\underline{Z}_2 = \frac{I_{2N}\phi Z_2}{U_{1N}\phi}$

4) 功率 $\underline{S} = \frac{S}{S_N} = \underline{U} \cdot \underline{I}$

$$\underline{P} = \frac{P}{S_N} = \underline{U} \cdot \underline{I} \cos \varphi$$

$$\underline{Q} = \frac{Q}{S_N} = \underline{U} \cdot \underline{I} \sin \varphi$$

4.采用标么值的优点

1) 不论变压器或电机容量的大小，用标么值表示的参数和性能数据通常都在一定的范围以内，因此便于比较和分析。例如：空载电流 $I_0 = 0.005 \sim 0.025$ ，短路阻抗标么值 $Z_k = 0.04 \sim 0.105$ 。

2) 未折算值的标么值与折算值的标么值相等。

$$\begin{aligned} \underline{R}'_2 &= \frac{R'_2}{Z_{1N}} = \frac{R'_2}{\frac{U_{1N\phi}}{I_{1N\phi}}} = \frac{k^2 R_2}{\frac{k U_{2N\phi}}{\frac{I_{2N\phi}}{k}}} \\ &= \frac{k^2 R_2}{\frac{k^2 U_{2N\phi}}{I_{2N\phi}}} = \frac{R_2}{Z_{2N}} = \underline{R}_2 \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} \underline{U}'_2 = \underline{U}_2 \\ \underline{I}'_2 = \underline{I}_2 \\ \underline{R}'_2 = \underline{R}_2 \\ \underline{X}'_2 = \underline{X}_2 \\ \underline{E}'_2 = \underline{E}_2 \\ \vdots \end{array} \right.$$

4.采用标么值的优点

3) 线值与相值的标么值相等。

Yd接法三相变压器

$$\underline{U}_{1\phi} = \frac{U_{1\phi}}{U_{1N\phi}} = \frac{\sqrt{3}U_{1\phi}}{\sqrt{3}U_{1N\phi}} = \frac{U_1}{U_{1N}} = \underline{U}_{1l}$$

4) 一相功率与三相功率的标么值相等。

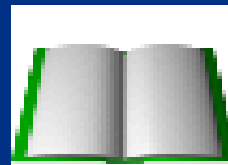
$$\underline{P}_{\phi} = \frac{U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi}{S_{N\phi}} \frac{3}{3} = \frac{\sqrt{3}U_l I_l \cos \varphi}{S_N} = \frac{p}{S_N} = \underline{P}$$

4.采用标幺值的优点

- 5) 采用标幺值后，某些意义不同的物理量具有相同的标幺值。
- 6) 各标幺值乘以100则变成相应物理量的百分值。

5.采用标幺值的缺点

标幺值没有单位，物理意义不明确。



【例题 2-2】

§ 2-5 变压器参数的测定

• 变压器的参数：激磁阻抗 $Z_m = R_m + jX_m$

$$\text{短路阻抗 } Z_k = R_k + jX_k$$

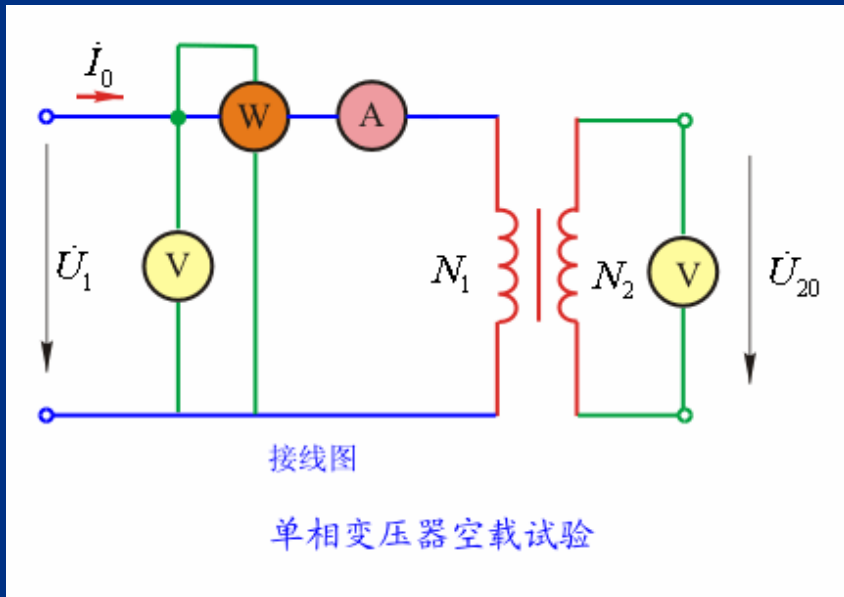
- 空载试验：测定激磁参数 Z_m 、 R_m 、 X_m 和变比 k
- 短路试验：测定短路参数 Z_k 、 R_k 、 X_k

1. 变压器的空载试验

1) 试验目的：测定激磁参数 Z_m 、 R_m 、 X_m 和变比 k

1. 变压器的空载试验

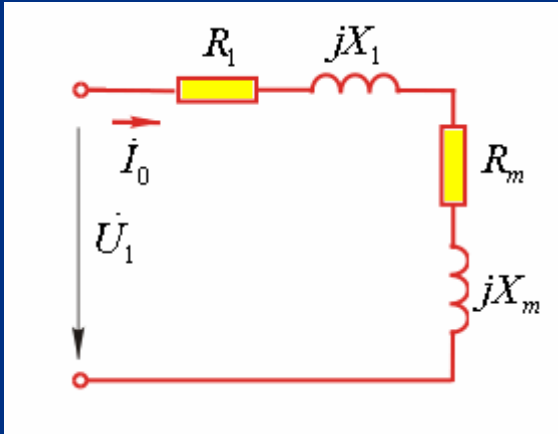
2) 试验接线：按额定电压选择电压表量程，按额定电流的（2%-10%）选择电流表和瓦特表的电流档量程。



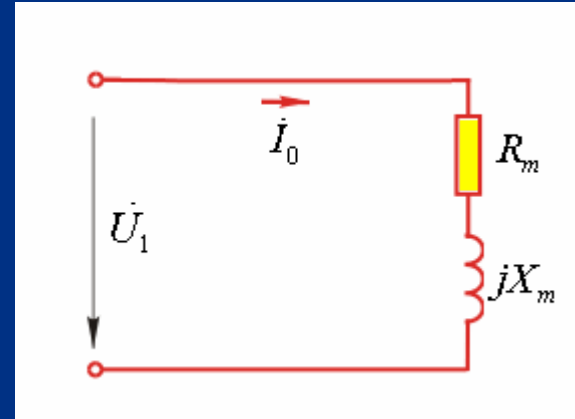
3) 试验方法：二次绕组开路，一次绕组加以额定电压 U_{1N} ，测量此时的输入功率 P_0 、电压 U_{20} 和电流 I_0 。

1. 变压器的空载试验

4) 参数测定



忽略 Z_1

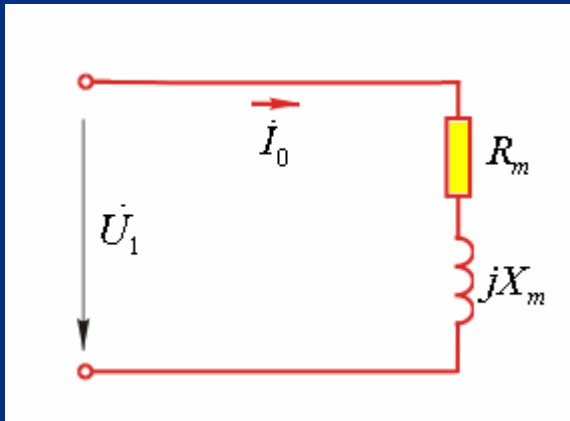


$$\left. \begin{array}{l} Z_0 = Z_1 + Z_m \\ R_1 \ll R_m \\ X_1 \ll X_m \end{array} \right\} \Rightarrow Z_0 \approx Z_m$$

$$R_1 \ll R_m \Rightarrow P_0 = p_{Cu1} + p_{Fe} \approx p_{Fe} = I_0^2 R_m$$

1. 变压器的空载试验

4) 参数测定



$$\text{变比 } k = \frac{U_{1N}}{U_{20}}$$

$$\text{励磁阻抗 } |Z_m| = \frac{U_{1N}}{I_0}$$

$$\text{励磁电阻 } R_m = \frac{P_0}{I_0^2}$$

$$\text{励磁电抗 } X_m = \sqrt{|Z_m|^2 - R_m^2}$$

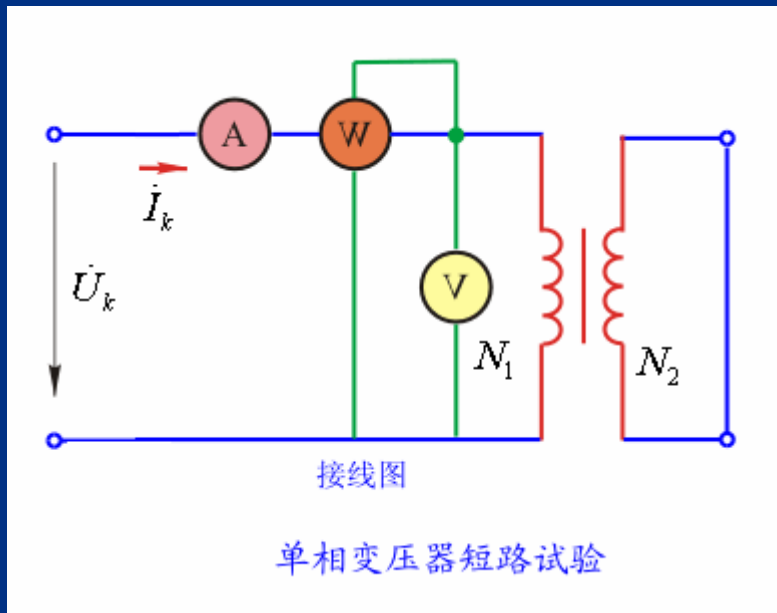
1.变压器的空载试验

注意:

- 对于三相变压器，各公式中的电压、电流和功率均为相值。
- 由于 R_m 、 X_m 与磁路的饱和程度有关，因此在空载试验中应取额定电压点来计算 R_m 、 X_m 的值。
- 空载试验可以在任何一侧做，为了试验方便和安全，一般空载试验在低压侧进行。
- 如果求高压侧参数，需要进行折算。

2. 变压器的短路试验

- 1) 试验目的：测定短路参数 Z_k 、 R_k 、 X_k
- 2) 试验接线：按额定电流选择电流表和瓦特表的电流档量程，按额定电压的(4%-10%)选择电压表和瓦特表的电压档量程。



- 3) 试验方法：二次绕组短路，一次绕组上所加电压从零逐渐升高，直到短路电流 $I_k=I_{1N}$ 为止，测量 U_k 、电流 I_k 和输入功率 P_k ，同时记录实验室的室温。

2. 变压器的短路试验

4) 参数测定

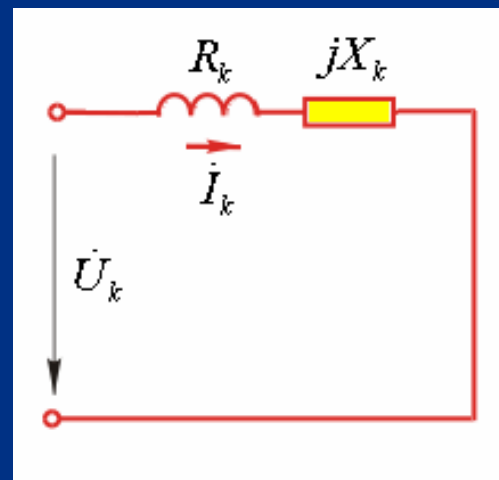
$$\left. \begin{aligned} U_k &\square U_{1N} \\ p_{Fe} &\approx C_{Fe} f^{1.3} B_m^2 G \end{aligned} \right\}$$

$$\Rightarrow P_k = p_{Cu} + p_{Fe} \approx p_{Cu} = I_k^2 R_k$$

$$\text{短路阻抗 } |Z_k| = \frac{U_k}{I_k}$$

$$\text{短路电阻 } R_k = \frac{P_k}{I_k^2}$$

$$\text{短路电抗 } X_k = \sqrt{|Z_k|^2 - R_k^2}$$



对T型等效电路:

$$R_1 \approx R_2' = \frac{1}{2} R_k$$

$$X_1 \approx X_2' = \frac{1}{2} X_k$$

2.变压器的短路试验

注意:

- 电阻应换算到基准工作温度时的数值。

铜线
$$R_{k75^{\circ}C} = R_k \frac{234.5 + 75}{234.5 + \theta}$$

铝线
$$R_{k75^{\circ}C} = R_k \frac{225 + 75}{225 + \theta}$$

$$|Z_{k75^{\circ}C}| = \sqrt{|R_{k75^{\circ}C}|^2 + X_k^2}$$

- 对于三相变压器，公式中的电压、电流和功率均为相值。
- 短路空载试验可以在任何一侧做，为了试验方便和安全，一般短路试验在高压侧进行。

3. 短路电压（阻抗电压）

1) 短路电压就是短路试验时使短路电流为额定值时一次侧所加的电压，以 U_{kN} 表示，记作

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

2) 短路电压通常用占额定电压的百分数表示，即

$$u_k \% = \frac{I_{1N} |Z_{k75^\circ C}|}{U_{1N}} \times 100\%$$

$$u_k \% = \frac{|Z_{k75^\circ C}|}{U_{1N}}$$

短路电压有功分量 $u_{ka} \% = \frac{I_{1N} R_{k75^\circ C}}{U_{1N}} \times 100\%$

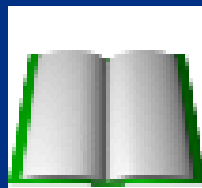
$$u_{ka} \% = \frac{R_{k75^\circ C}}{U_{1N}}$$

短路电压无功分量 $u_{kr} \% = \frac{I_{1N} X_k}{U_{1N}} \times 100\%$

$$u_{kr} \% = \frac{X_k}{U_{1N}}$$

3. 短路电压（阻抗电压）

3) 短路电压的大小直接反映短路阻抗的大小，而短路阻抗又直接影响变压器的运行性能。从正常运行角度看，希望它小些，这样可使二次测电压随负载波动小些；从限制短路电流角度，希望它大些，相应的短路电流就小些。



【例题 2-3】

§ 2-6 变压器的运行性能

变压器的运行特性:

1) 外特性: $U_2=f(I_2)$

2) 效率特性: $\eta=f(I_2)$

变压器的主要运行性能指标:

1) 电压调整率 ΔU

2) 效率 η

★重点: 电压调整率 ΔU 的含义和计算; 效率 η 的计算

1. 变压器的电压调整率和外特性

1.1 电压调整率

1) **定义：** 变压器带上负载以后，电压变化的差值（二次额定电压 U_{2N} 与二次电压 U_2 之差）与二次额定电压的比值称为电压调整率，用 ΔU 表示，即

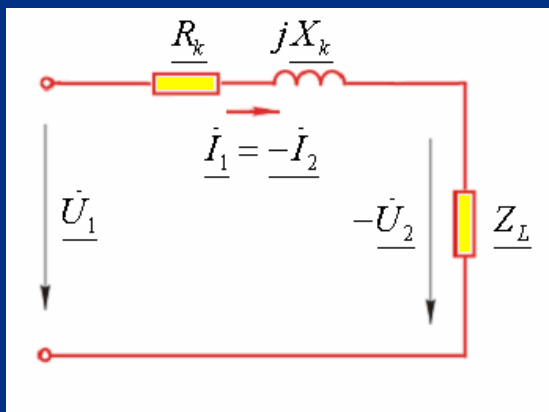
$$\Delta U = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100\%$$

电压调整率是表征变压器运行性能的重要指标之一，它反映了变压器端电压的稳定性能。

采用标么值表示为： $\Delta U = 1 - \underline{U}_2 = 1 - \underline{U}_2'$

1.1 电压调整率

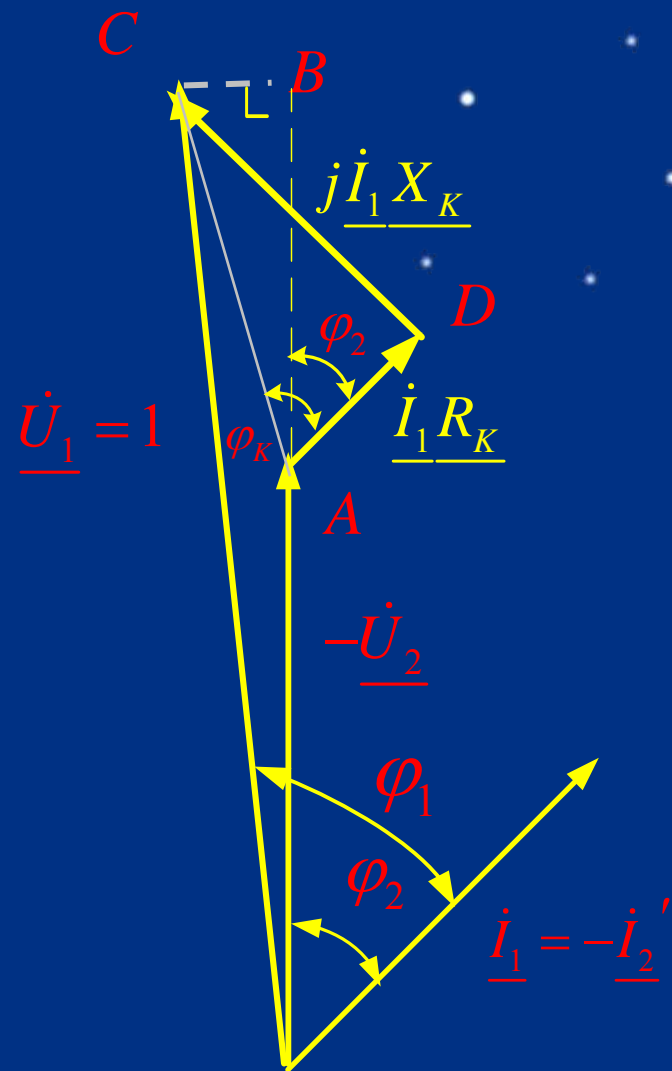
2) 计算公式



$$\underline{\dot{U}}_1 = -\underline{\dot{U}}_2 + \underline{\dot{I}}_1 \underline{Z}_k$$

$$\underline{U}_{1N} \approx \underline{U}'_2 + \overline{AB} \Rightarrow \overline{AB} \approx 1 - \underline{U}'_2$$

$$\Rightarrow \Delta U \approx \overline{AB}$$



感性负载简化相量图

1.1 电压调整率

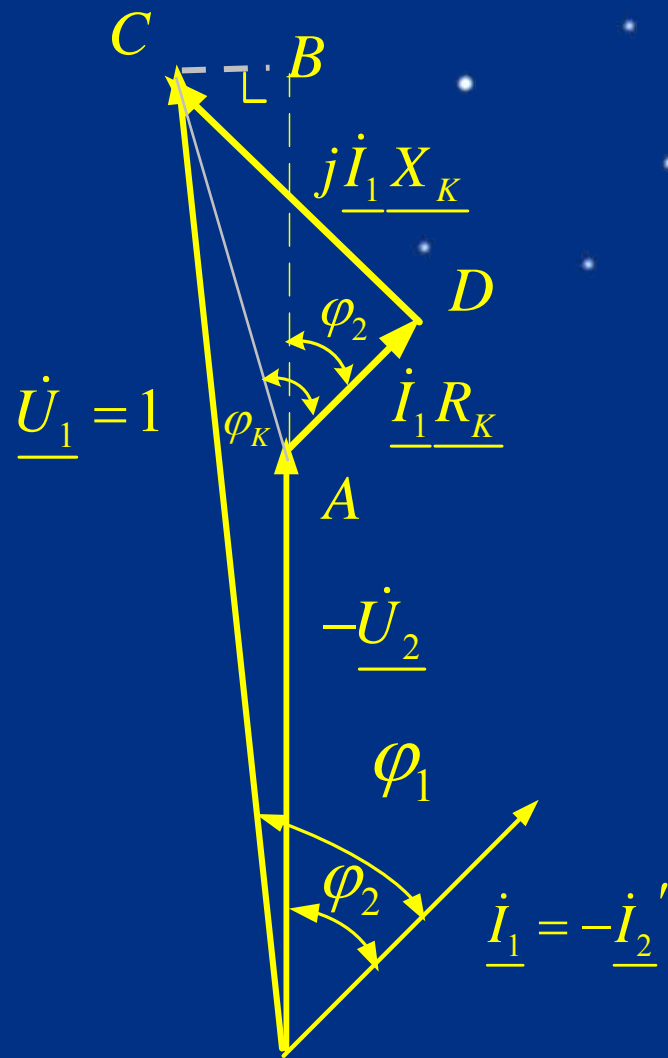
2) 计算公式

$$\begin{aligned}\Delta U &\approx \overline{AB} = \underline{I}_1 \left| \underline{Z}_k \right| \cos(\varphi_k - \varphi_2) \\ &= \underline{I}_1 \left| \underline{Z}_k \right| (\cos \varphi_k \cos \varphi_2 + \sin \varphi_k \sin \varphi_2) \\ &= \beta (\underline{R}_k \cos \varphi_2 + \underline{X}_k \sin \varphi_2)\end{aligned}$$

式中： $\beta = \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_{1N}} = \frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_{2N}}$

β 称为负载系数。

$\beta=1$ 时的 ΔU 称为额定电压调整率，
标志着变压器输出电压的稳定程度。



感性负载简化相量图

1.1 电压调整率

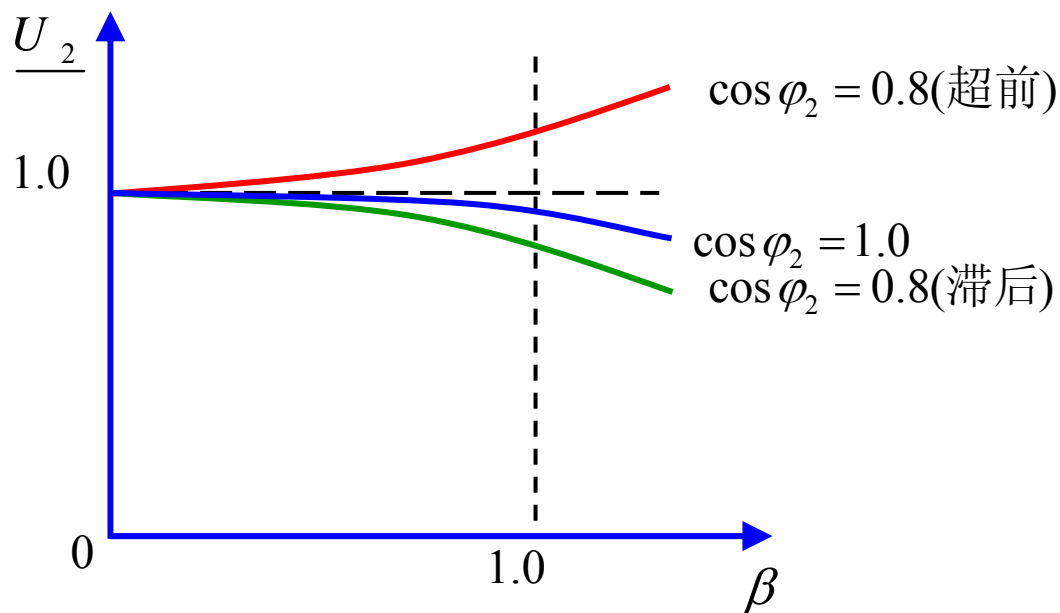
$$\Delta U = \beta(\underline{R}_k \cos \varphi_2 + \underline{X}_k \sin \varphi_2)$$

3) 结论

- ① ΔU 的大小与短路阻抗的标么值 $|\underline{Z}_k|$ (\underline{R}_k 、 \underline{X}_k)、负载大小 (β) 和负载性质 ($\cos \varphi_2$) 有关;
- ② 电阻性负载 ($\varphi_2=0$) 或感性负载 ($\varphi_2>0$) 时, $\Delta U>0$, 二次侧端电压 U_2 随负载电流 I_2 的增大而下降;
- ③ 容性负载 ($\varphi_2<0$) 时, 若 $|\underline{X}_k \sin \varphi_2| > \underline{R}_k \cos \varphi_2$, 则 $\Delta U<0$, 二次侧端电压 U_2 随负载电流 I_2 的增大而升高。

1.2 外特性

当变压器一次侧加额定电压，负载功率因数一定时，二次端电压 U_2 随负载电流 I_2 变化的关系，即 $U_2=f(I_2)$ ，称为变压器的外特性。



2. 变压器的损耗、效率和效率特性

2.1 损耗

变压器运行时将产生损耗，变压器的损耗分为铜耗和铁耗两类。

1) 铁耗

$$P_{Fe} \approx C_{Fe} f^{1.3} B_m^2 G \longrightarrow P_{Fe} \propto B_m^2 \propto E_1^2 \approx U_1^2$$

- 铁耗与外加电压大小有关，而与负载大小基本无关，由于变压器的一次电压保持不变，故铁耗可视为**不变损耗**。

$$P_{Pe} \approx P_0$$

2.1 损耗

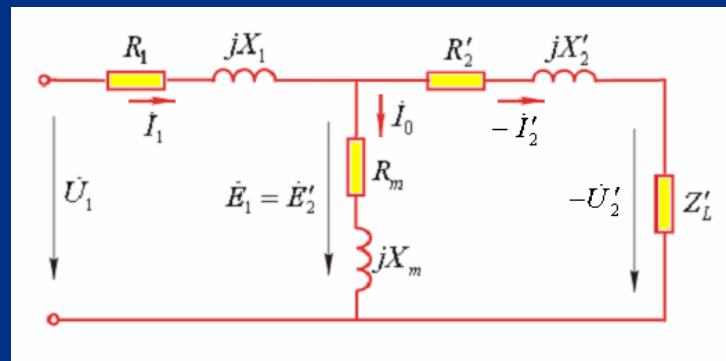
2) 铜耗

铜耗与负载电流的平方成正比，因而也称为可变损耗。

$$P_{Cu} \propto I^2 \propto \beta^2$$

变压器额定负载时的铜耗（即额定短路功率）为 P_{kN} ，
则任意负载时的铜耗为

$$P_{Cu} = \beta^2 P_{kN}$$



2.2 效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p}$$

P_2 的计算:

若忽略二次端电压在负载时的变化, 即认为 $U_2 \approx U_{2N}$, 则

单相变压器:

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \approx \beta U_{2N} I_{2N} \cos \varphi_2 = \beta S_N \cos \varphi_2$$

三相变压器:

$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 \approx \sqrt{3} \beta U_{2N} I_{2N} \cos \varphi_2 = \beta S_N \cos \varphi_2$$

2.2 效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p}$$

$$P_2 \approx \beta S_N \cos \varphi_2$$

$$\sum p = p_{Fe} + p_{Cu} = P_0 + \beta^2 P_{kN}$$

$$\rightarrow \eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{kN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{kN}}$$

★影响变压器效率的因素有：①负载的大小（ β ）；②负载的性质（ $\cos \varphi_2$ ）；③变压器本身的损耗（ p_{Cu} 、 p_{Fe} ）。

2.3 效率特性

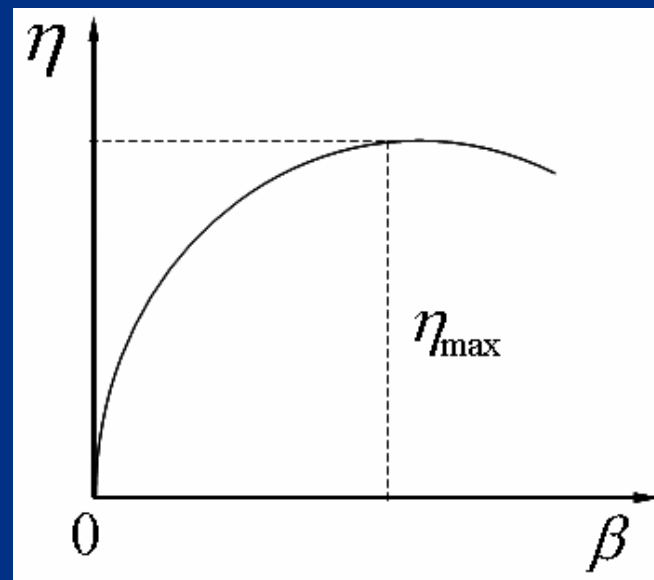
•效率特性：当 $U_1=U_{1N}$ ， $\cos\varphi_2=C$ 时，变压器的效率 η 与负载系数 β 之间的关系，即 $\eta=f(\beta)$ 。

2.4 最大效率

令 $\frac{d\eta}{d\beta} = 0$ ，可得变压器产生最

大效率的条件为

$$\beta_m^2 P_{kN} = P_0 \quad \text{或} \quad \beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{kN}}}$$

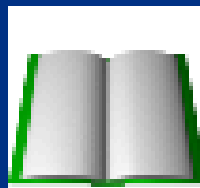


2.4 最大效率

即当铜耗等于铁耗(可变损耗等于不变损耗)时, 变压器效率最大:

$$\eta_{\max} = \left(1 - \frac{2P_0}{\beta_m S_N \cos \varphi_2 + 2P_0}\right) \times 100\%$$

为了提高电力变压器运行的经济性, 设计时, 应使变压器的铁损耗小些, 一般取 $\beta_m = 0.5 \sim 0.6$ 。变压器额定负载时的效率一般在(95~98)%之间, 大型变压器可达99%以上。



【例题 2-4】

第二章 小结

1. 变压器是通过电磁感应作用，把一种电压的交流电能转换成同频率的另一种电压的交流电能的静止电机。在变压器中主要存在电势平衡和磁势平衡两个基本电磁关系，二次侧对一次侧的影响是通过二次绕组磁势起作用的。

2. 为了便于研究，将变压器磁场的分布等值为两部分磁通：主磁通和漏磁通。主磁通和漏磁通的性质和作用各不相同。主磁通沿铁心闭合，其磁路是一种非线性磁路，主磁通在一、二次绕组中分别感应电势 E_1 和 E_2 ，将电磁功率从一次绕组传递到二次绕组，起传递能量的作用。漏磁通主要沿非铁磁性材料闭合，其磁路是一种线性磁路，漏磁通只产生漏抗压降，不直接参与从一次绕组到二次绕组的能量传递。

第二章 小结

3. 在变压器中既有电路关系，又有磁路关系。通过引入激磁阻抗 Z_m 、一次绕组漏电抗 X_1 、二次绕组漏电抗 X_2 等电路参数，可以把磁场问题转化为电路问题。激磁电阻 R_m 是表征铁耗的等效电阻。激磁电抗 X_m 反映了主磁通对电路的电磁效应，是与主磁通对应的电抗。一次绕组漏电抗 X_1 反映了一次绕组漏磁通对电路的电磁效应，是同一次绕组漏磁通相对应的电抗。二次绕组漏电抗 X_2 反映了二次绕组漏磁通对电路的电磁效应，是同二次绕组漏磁通相对应的电抗。

第二章 小结

4. 在分析变压器内部的电磁关系时，可采用基本方程式、等效电路或相量图。基本方程式是变压器电磁关系的数学表达式，相量图是基本方程式的图形表示法，而等效电路则是反应变压器内部电磁关系的模拟电路，这三者是统一的。在对变压器进行定量计算时，采用等效电路。在作定性分析时，则采用相量图。

5. 变压器的电压调整率 ΔU 和效率 η 是表征变压器运行性能的两个主要指标。 ΔU 的大小反映了变压器负载运行时二次端电压的稳定性，即供电的质量。效率 η 的高低则说明了变压器运行时的经济性。 ΔU 、效率 η 与负载的性质及负载的大小等因素有关。

★某些意义不同的物理量具有相同的标么值:

当变压器满载运行时，即 $I_1=I_{1N}$ 时，对于三相变压器，有

$$\underline{R_1} = \frac{R_1}{\frac{U_{1N\phi}}{I_{1N\phi}}} = \frac{I_{1N\phi} R_1}{U_{1N\phi}}$$

$$\frac{I_{1N\phi} R_1}{U_{1N\phi}} = \frac{I_{1N\phi} R_1}{U_{1N\phi}} = \underline{R_1}$$

$$\frac{3I_{1N\phi}^2 R_1}{S_N} = \frac{3I_{1N\phi}^2 R_1}{3I_{1N\phi} U_{1N\phi}} = \frac{I_{1N\phi} R_1}{U_{1N\phi}} = \underline{R_1}$$



【例题 2-1】

一台三相变压器, $S_N=5600\text{kVA}$, 50Hz , Yd联结, $U_{1N}/U_{2N}=6000/400\text{V}$, 每相短路阻抗 $Z_k=0.06+j0.29\ \Omega$, 每相负载阻抗 $Z_L=0.1+j0.06\ \Omega$, 求该变压器一次侧加额定电压时的一、二次侧电流 I_1 和 I_2 。

$$\text{解: } k = \frac{U_{1N\phi}}{U_{2N\phi}} = \frac{U_{1N} / \sqrt{3}}{U_{2N}} = \frac{6000 / \sqrt{3}}{400} = 8.66$$

$$Z'_L = k^2 Z_L = 8.66^2 (0.1 + j0.06) = 7.5 + j4.5(\Omega)$$

$$I_1 = I_{1\phi} = \frac{U_{1N} / \sqrt{3}}{|Z_k + Z'_L|} = \frac{6000 / \sqrt{3}}{|(0.06 + j0.29) + (7.5 + j4.5)|} = 387.1(\text{A})$$

$$I_{2\phi} = k I'_{2\phi} = k I_{1\phi} = 8.66 \times 387.1 = 3352(\text{A})$$

$$I_2 = \sqrt{3} I_{2\phi} = \sqrt{3} \times 3352 = 5806(\text{A})$$



【例题 2-2】

一台单相变压器, $S_N = 20000\text{KVA}$, $U_{1N}/U_{2N} = \frac{220}{\sqrt{3}}/11\text{KV}, 50\text{Hz}$ 。

参数 $R_1 = R'_2 = 3.22\Omega$, $X_1 = X'_2 = 29.15\Omega$, $R_m = 3040\Omega$, $X_m = 32200\Omega$,
 $Z_L = 4.6 + j3.45\Omega$ 。

试求:当一次侧外施额定电压时,二次电流 I_2 、二次电压 U_2 和负载的功率因数 $\cos\varphi_2$ 。

解:利用T型等效电路求解,为便于计算,采用标么值。

变比

$$k = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{220/\sqrt{3}}{11} = 11.55$$

一次、二次额定电流为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{20000}{220/\sqrt{3}} \text{ A} = 157.46(\text{A})$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{20000}{11} = 1818.2(\text{A})$$

各参数的标么值为

$$\underline{R}_1 = \underline{R}'_2 = \frac{I_{1N} R_1}{U_{1N}} = \frac{157.46 \times 3.22}{220 \times 10^3 / \sqrt{3}} = 0.004$$

$$\underline{X}_1 = \underline{X}'_2 = \frac{I_{1N} X_1}{U_{1N}} = \frac{157.46 \times 29.15}{220 \times 10^3 / \sqrt{3}} = 0.036$$

$$\underline{R}_m = \frac{I_{1N} R_m}{U_{1N}} = \frac{157.46 \times 3040}{220 \times 10^3 / \sqrt{3}} = 3.77$$

$$\underline{X}_m = \frac{I_{1N} X_m}{U_{1N}} = \frac{157.46 \times 32200}{220 \times 10^3 / \sqrt{3}} = 39.9$$

$$\underline{R}_L = \frac{I_{2N} R_L}{U_{2N}} = \frac{1818.2 \times 4.6}{11 \times 10^3} = 0.76$$

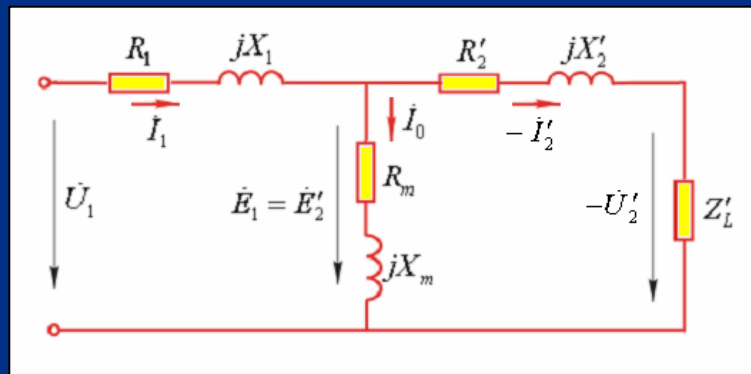
$$\underline{X}_L = \frac{I_{2N} X_L}{U_{2N}} = \frac{1818.2 \times 3.45}{11 \times 10^3} = 0.57$$

令 $\underline{\dot{U}}_1 = 1 \angle 0^\circ$, 则

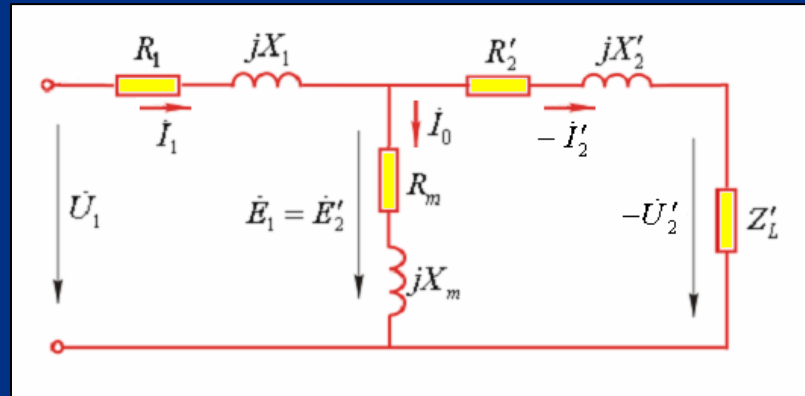
$$\underline{\dot{I}}_1 = \frac{\underline{\dot{U}}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_m // (\underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_L)}$$

$$= \frac{1 \angle 0^\circ}{(0.004 + j0.036) + (3.77 + j39.9) // (0.004 + j0.036 + 0.76 + j0.57)}$$

$$= \frac{1 \angle 0^\circ}{0.985 \angle 40.88^\circ} = 1.015 \angle -40.88^\circ$$



$$\begin{aligned}
 -\underline{\dot{I}}_2 &= \underline{\dot{I}}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_m + (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_L)} \\
 &= 1.015 \angle -40.88^\circ \cdot \frac{3.77 + j39.9}{3.77 + j39.9} \\
 &= 0.998 \angle -39.89^\circ
 \end{aligned}$$



$$\underline{\dot{I}}_2 = 0.998 \angle -219.89^\circ$$

$$\underline{\dot{U}}_2 = \underline{\dot{I}}_2 \underline{Z}_L = 0.998 \angle -219.89^\circ (0.76 + j0.57) = 0.948 \angle -183.02^\circ$$

所以二次电流为

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_2 I_{2N} = 0.998 \times 1818.2 = 1814.6(\text{A})$$

二次电压为

$$U_2 = \underline{U_2} U_{2N} = 0.948 \times 110 = 104.3(kV)$$

二次电压 \dot{U}_2 与电流 \dot{I}_2 的相位差为

$$\varphi_2 = 0.998 \angle (0.76 + j0.57) = -183.02^\circ - (-219.89^\circ) = 36.87^\circ$$

负载的功率因数为

$$\cos \varphi_2 = \cos 36.87^\circ = 0.80$$



【例题 2-3】

一台单相变压器， $S_N=20000\text{kVA}$ ， 50Hz ， $U_{1N}/U_{2N}=127\text{kV}/11\text{kV}$ ，在 15°C 时空载和短路试验数据如下：

试验名称	电压	电流	功率	备注
空载试验	11KV	45.5A	47KW	电压加在低压侧
短路试验	9.24KV	157.5A	129KW	电压加在高压侧

试求：(1) 折算到高压侧的激磁阻抗和短路阻抗的值；

(2) 已知 $R_1 = 3.9\Omega$ ，设 $X_1 = X'_2$ ，画出T形等效电路。

解：一次和二次绕组的额定电流为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{20000}{127} = 157.7(\text{A})$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{20000}{11} = 1818.2(\text{A})$$

变比

$$k = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{127}{11} = 11.55$$

1. 折算到高压侧的激磁阻抗

$$|Z_m| = k^2 |Z_{m2}| = k^2 \left(\frac{U_{20}}{I_{20}} \right) = 11.55^2 \times \left(\frac{11 \times 10^3}{45.5} \right) = 32257(\Omega)$$

$$R_m = k^2 R_{m2} = k^2 \times \frac{P_{20}}{I_{20}^2} = 11.55^2 \times \frac{47 \times 10^3}{45.5^2} = 3028(\Omega)$$

$$X_m = \sqrt{|Z_m|^2 - R_m^2} = \sqrt{32257^2 - 3028^2} = 32110(\Omega)$$

短路阻抗（高压侧）

$$|Z_K| = \frac{U_{1K}}{I_{1K}} = \frac{9240}{157.5} = 58.7(\Omega)$$

$$R_k = \frac{P_{1k}}{I_{1k}^2} = \frac{129 \times 10^3}{157.5^2} = 5.2(\Omega)$$

$$X_k = \sqrt{|Z_k|^2 - R_k^2} = \sqrt{58.7^2 - 5.2^2} = 58.5(\Omega)$$

换算到75°C

$$R_{k75^{\circ}\text{C}} = 5.2 \times \frac{234.5 + 75}{234.5 + 15} = 6.45(\Omega)$$

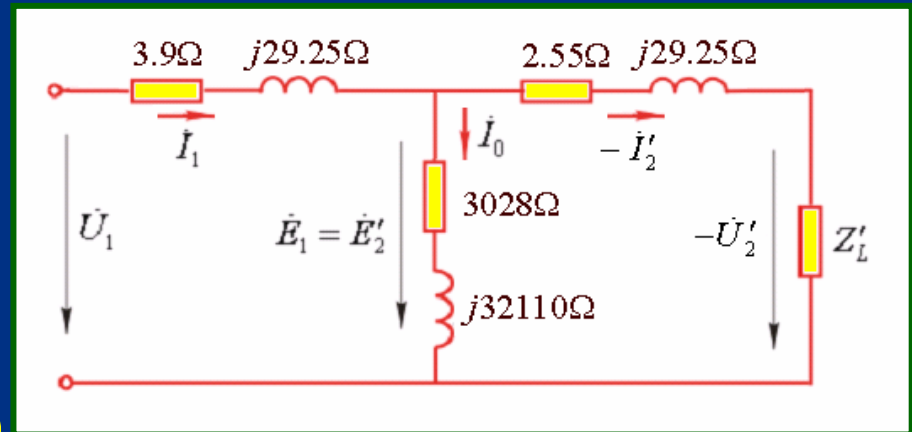
$$|Z_{k75^{\circ}\text{C}}| = \sqrt{R_{k75^{\circ}\text{C}}^2 + X_k^2} = \sqrt{6.45^2 + 58.5^2} = 58.9(\Omega)$$

(2) T形等效电路图如右图所示，图中

$$R_1 = 3.9\Omega$$

$$R_2' = R_{k75^{\circ}\text{C}} - R_1 = 2.55(\Omega)$$

$$X_1 = X_2' = \frac{1}{2} X_k = 29.25(\Omega)$$



【例题 2-4】

一台三相电力变压器，已知其参数和损耗为 $\underline{R}_k = 0.008$, $\underline{X}_k = 0.0725$, $P_0 = 47kW$, $P_{kN} = 160kW$, 求此变压器带上额定负载, $\cos\varphi_2=0.8$ (滞后) 时的额定电压调整率和额定效率, 并计算变压器最大效率和达到最大效率时的负载因数.

解: 额定电压调整率

$$\begin{aligned}\Delta U &= (\underline{R}_k \cos \varphi_2 + \underline{X}_k \sin \varphi_2) \times 100\% \\ &= (0.008 \times 0.8 + 0.0725 \times 0.60) \times 100\% = 4.99\%\end{aligned}$$

额定效率

$$\eta_N = 1 - \frac{P_0 + P_{kN}}{S_N \cos \varphi_2 + P_0 + P_{kN}} = 1 - \frac{47 + 160}{2000 \times 0.8 + 47 + 160} = 98.75\%$$

(2) 达到最大效率时的负载因数

$$\beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{kN}}} = \sqrt{\frac{47}{160}} = 0.542$$

最大效率

$$\begin{aligned}\eta_m &= 1 - \frac{2P_0}{\beta S_N \cos \varphi_2 + 2P_0} \\ &= 1 - \frac{2 \times 47}{0.542 \times 2000 \times 0.8 + 2 \times 47} = 98.92\%\end{aligned}$$

