



第5章 变压器

Chapter 5 Transformers





- 一. 概述
- 二. 变压器的空载运行
- 三. 变压器负载运行
- 四. 标么值
- 五. 变压器参数测定
- 六. 变压器的运行特性
- ~~七. 变压器的连接组别~~
- ~~八. 变压器的并联运行~~
- ~~九. 自藕变压器~~
- ~~一〇. 仪用互感器~~



- 一. 概述
- 二. 变压器的空载运行
- 三. 变压器负载运行
- 四. 标么值
- 五. 变压器参数测定
- 六. 变压器的运行特性
- ~~七. 变压器的连接组别~~
- ~~八. 变压器的并联运行~~
- ~~九. 自藕变压器~~
- ~~一〇. 仪用互感器~~



一. 概述

本节学习要点：

1. 了解变压器**定义**、**变压器分类**
2. 掌握变压器的**结构**、**额定数据**

概述

什么是变压器？

变压器是一种**静止**的电气设备，它利用**电磁感应**作用将**一种等级**的电压和电流转化成**同频率**的**另一种等级**的电压和电流，实现电能的**传输**和**分配**。

发电厂
10.5~20kV

升压
变压器

110kV
220kV
500kV

降压
变压器

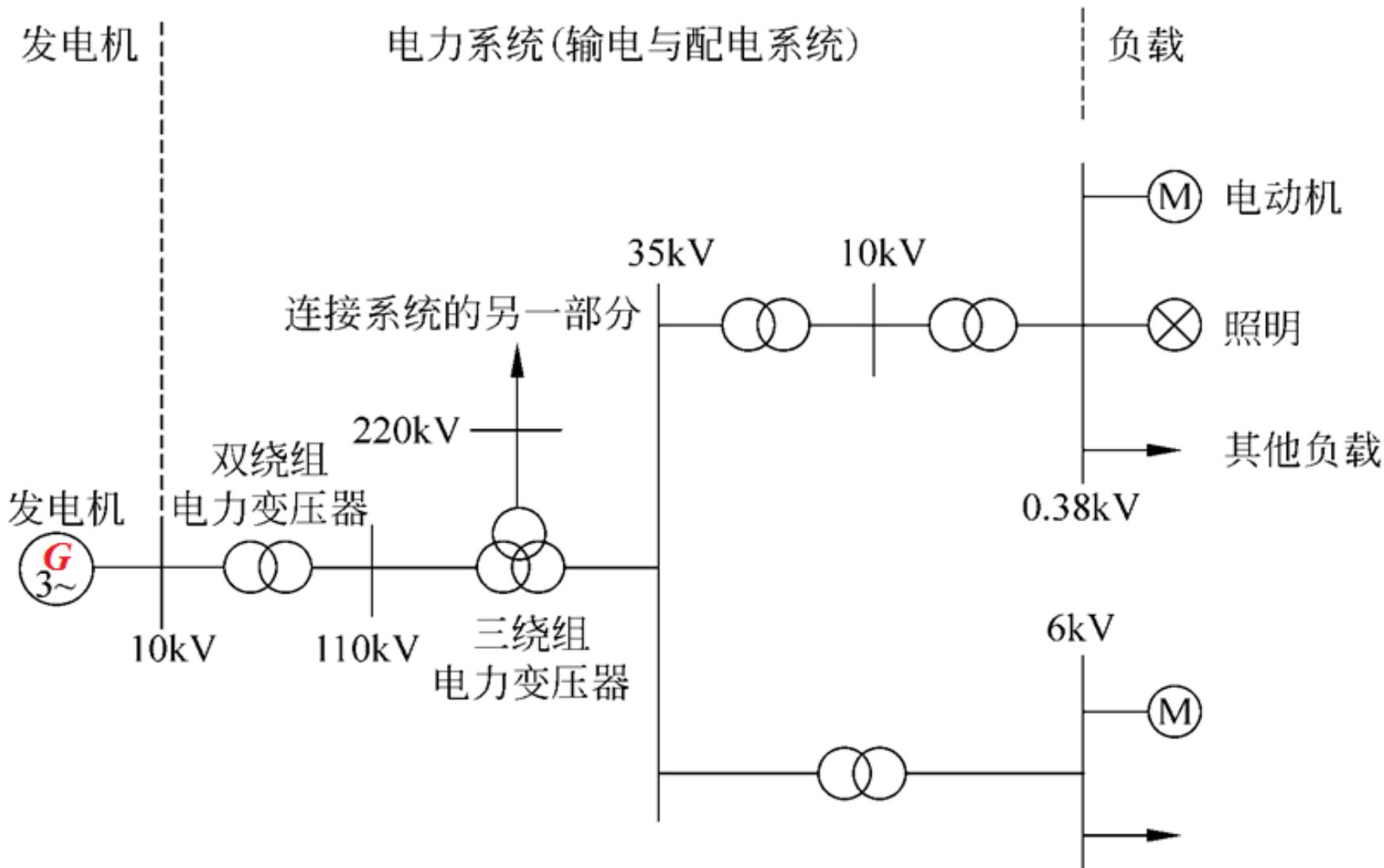
35kV
以下

配电
变压器

用户
220V
380V

为什么高压输电？

输送功率一定的电能时，输电线路的电压愈**高**，线路中的电流和损耗愈**小**。



简单的电力系统示意图

变压器的分类

用途

电力变压器

升压、降压、配电、联络等

特种变压器

整流变压器、电焊变压器等

仪用试验用
变压器

隔离、脉冲、互感器、自耦变压器等

铁心结构

芯式

绕组包围铁心，
装配简单

冷却
方式

空冷干式

油浸式

壳式

铁心包围绕组，
机械强度高

绕组
数目

双绕组

三绕组

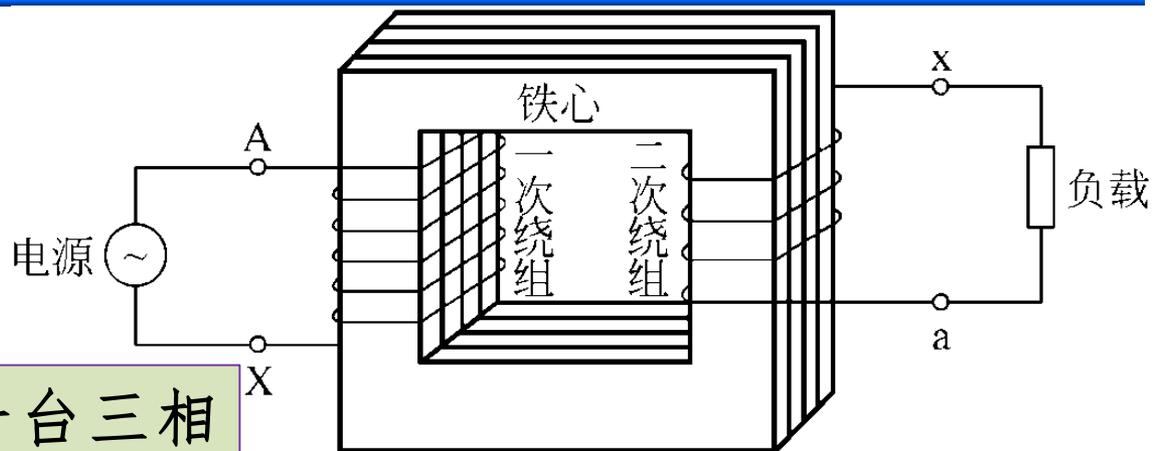
相数

单相

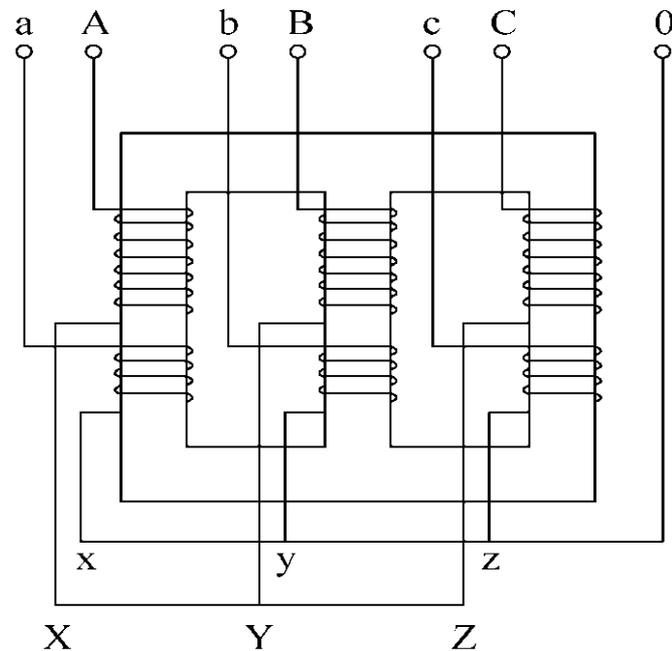
三相

每相有两个绕组的变压器叫**双绕组**变压器，每相有**三个绕组**的变压器叫**三绕组的**变压器。

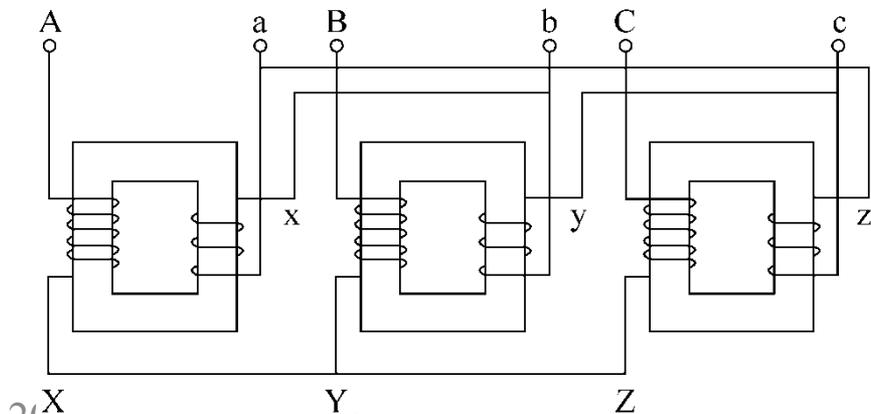
三个单相变压器可组成一台三相变压器，它们在电路上相互连接而**磁路上互相独立**，叫**三相变压器组**。也可将其磁路做成一个三铁芯柱式整体**闭合磁路**



变压器

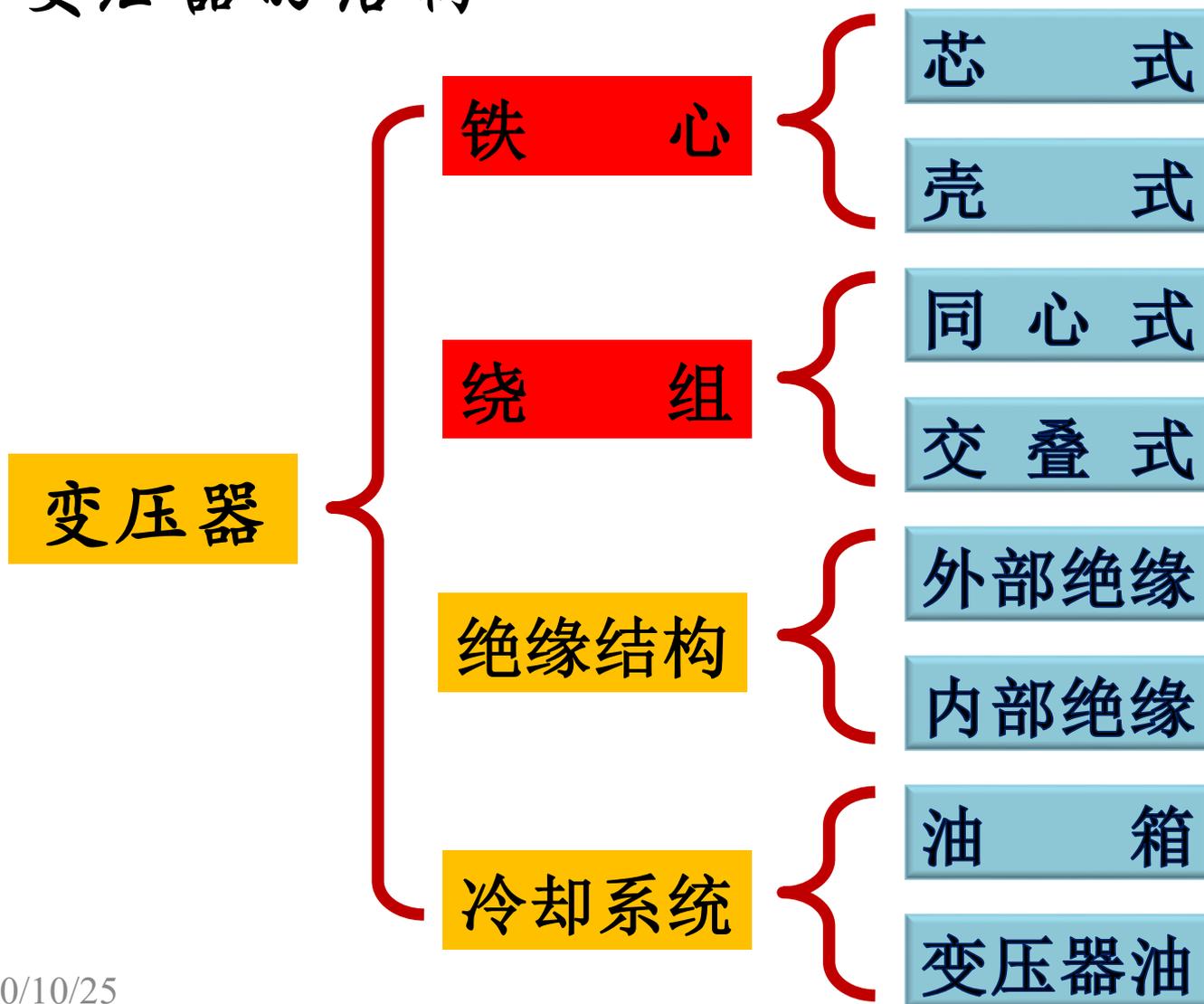


三铁芯柱式变压器 (Y/Y)⁸



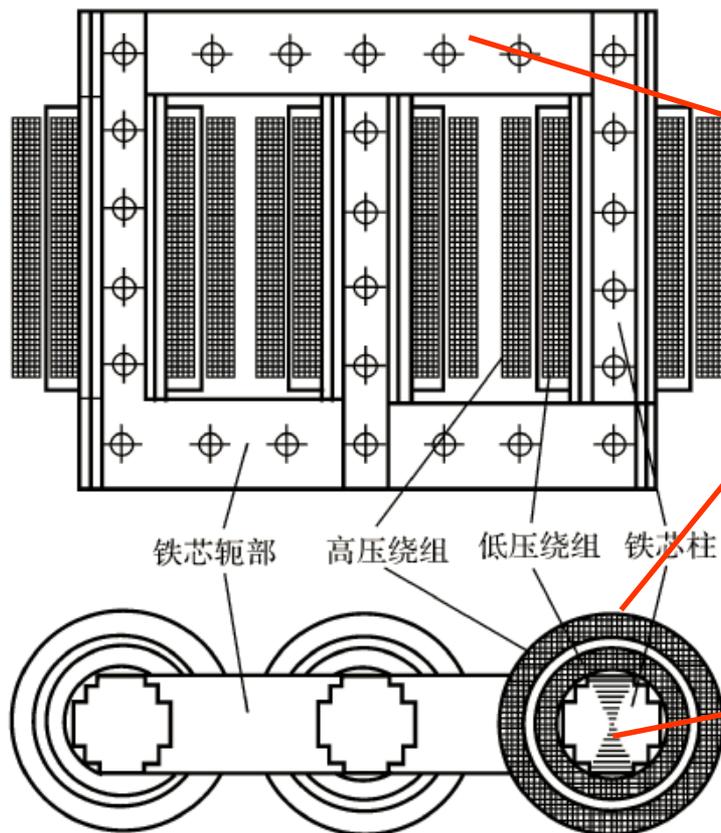
三相变压器组 (Y/Δ)

1. 变压器的结构



铁 心

0.35mm涂绝缘漆的硅钢片叠成
(提高导磁性能, 减小磁滞、涡流损耗)

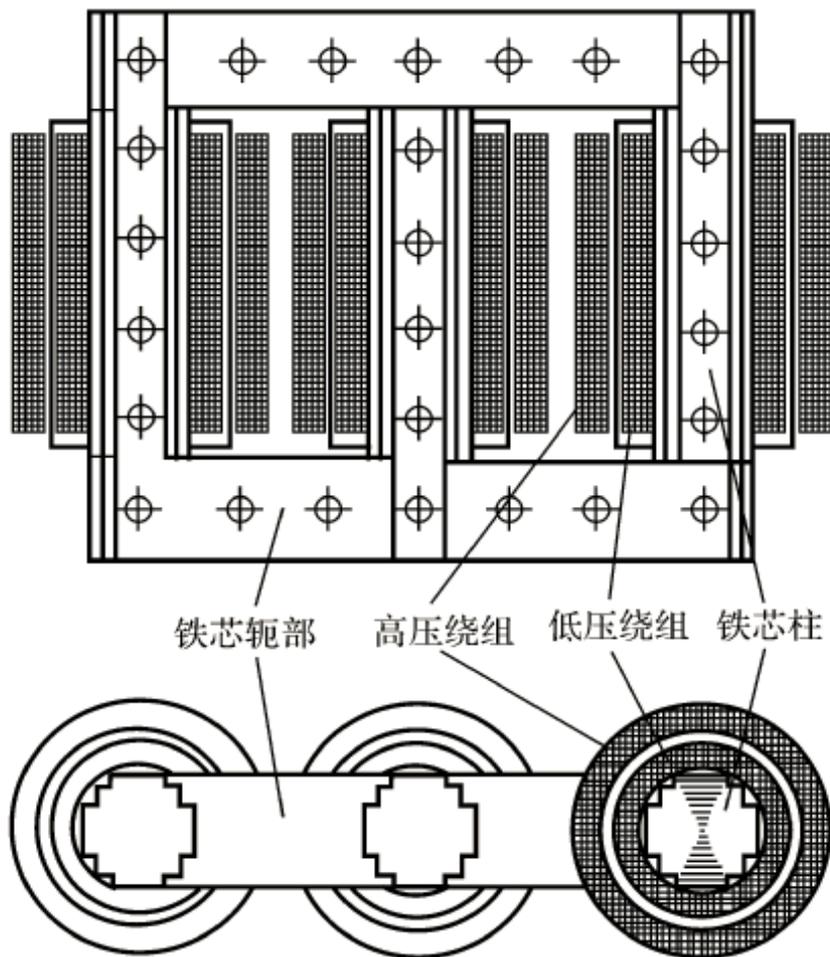


铁心装配一般采用**交错式**, 两层叠片的接缝处错开, 以**减小接缝处气隙**, 从而**减小激磁电流**。

绕组一般做成圆形, 便于制造及在电磁力下受力均匀, 机械强度高。

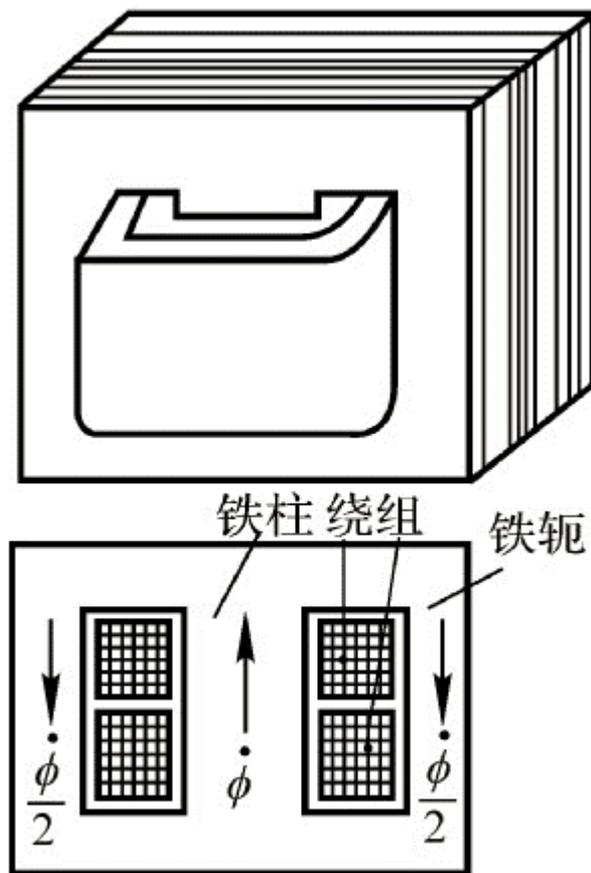
铁心柱一般做成阶梯多边形, 为了充分利用绕组内的圆柱形空间。阶梯越多, 截面越接近圆形。

三相**芯式**变压器铁心和绕组装配



三相**芯式**变压器铁心和绕组

2020/10/25

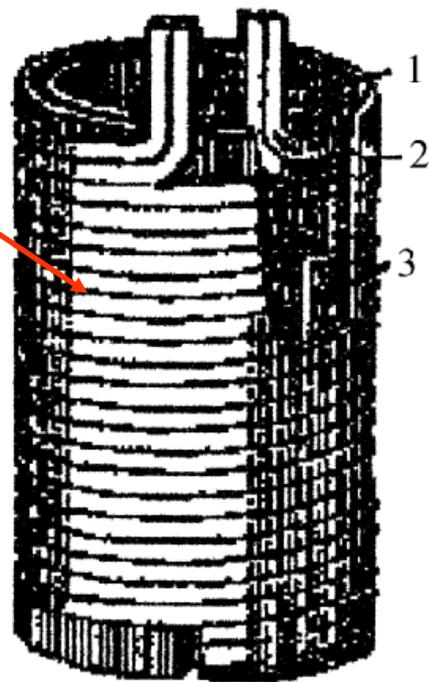


单相**壳式**变压器铁心和绕组

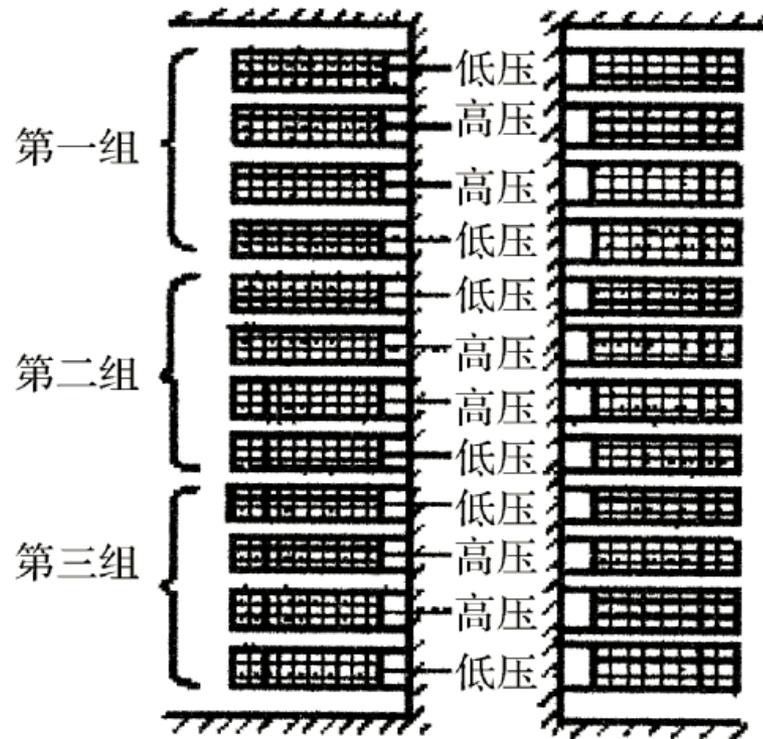
绕组

绝缘铜线或绝缘铝线绕成

通常将低压绕组靠近铁心放置，高压绕组套在低压绕组外面。可以减小绝缘距离，从而减小绕组和铁心尺寸。



(a)同心式绕组(线圈)



(b)交叠式绕组(线圈)

变压器绕组 (线圈)

绝缘结构

高压绝缘套管

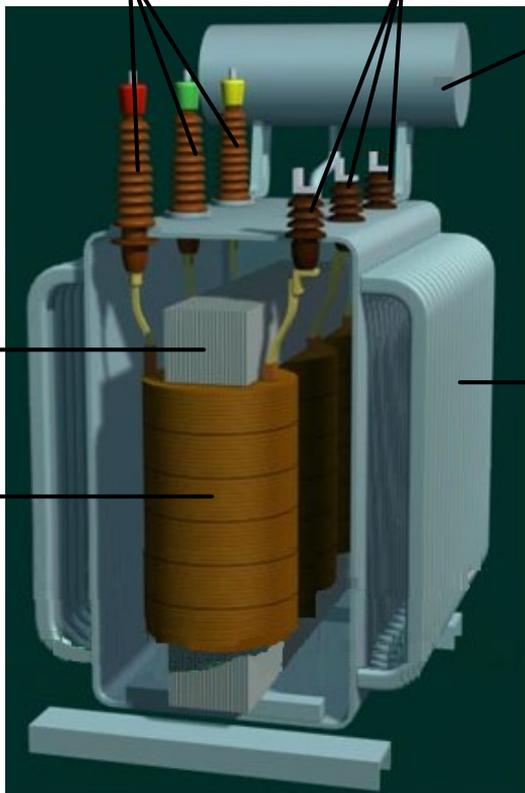
低压绝缘套管

油枕

铁芯

散热管

绕组



油浸式电力变压器

瓷质绝缘套管：使带电的引线和接地的油箱绝缘。为了增加表面放电距离，一般为**多极伞形**，电压越高，级数越多。

外部绝缘：指油箱盖外绝缘，主要是高、低压线圈引出瓷套管（瓷质绝缘套管）和空气的绝缘。

内部绝缘：指油箱内的绝缘，主要是绕组绝缘、内部引线绝缘。

冷却系统

油箱、变压器油（绝缘、冷却）。



2. 变压器的型号和额定数据 (铭牌数据)

额定容量 S_N (VA/kVA/MVA) 变压器额定的视在功率

对于双绕组变压器，一般原边和副边容量设计相等，能量传递效率高。

额定电压 (V/kV) **原边 U_{1N}** ：电源电压
副边 U_{2N} ：原边加额定电压，副边的空载电压

额定电流 (A) **原边 I_{1N}** 、**副边 I_{2N}** ，是在额定容量和额定电压时所应提供的的电流。

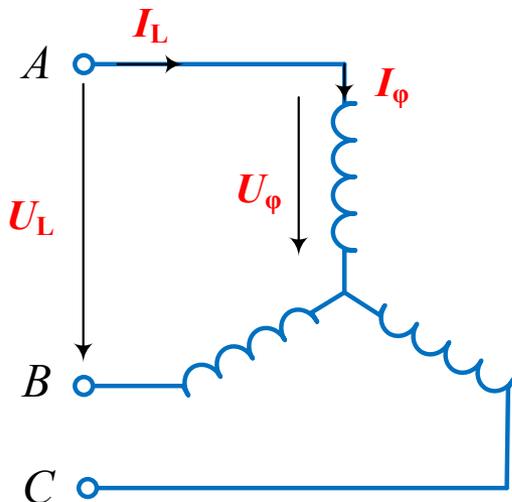
对于三相变压器，额定容量指三相容量之和；额定电压和额定电流指线电压和线电流。

单相： $S_N = U_{1N}I_{1N} = U_{2N}I_{2N}$

三相： $S_N = \sqrt{3}U_{1N}I_{1N} = \sqrt{3}U_{2N}I_{2N}$

额定频率 (Hz) 我国额定标准为50 Hz

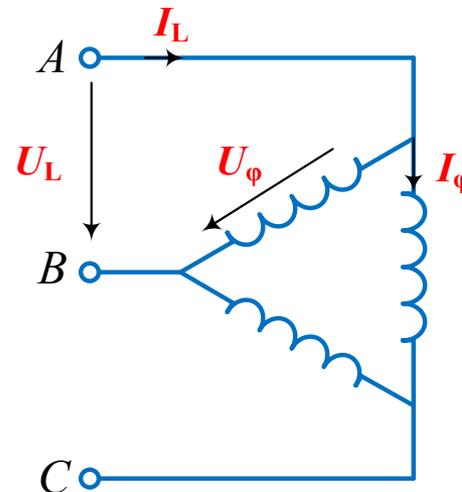
三相变压器 Δ/Y 中相和线之间关系



$$U_L = \sqrt{3}U_\phi$$

$$I_L = I_\phi$$

$$S_N = \sqrt{3}U_{1N}I_{1N} = 3U_\phi I_\phi$$



$$U_L = U_\phi$$

$$I_L = \sqrt{3}I_\phi$$



- 一. 概述
- 二. 变压器的空载运行**
- 三. 变压器负载运行
- 四. 标么值
- 五. 变压器参数测定
- 六. 变压器的运行特性
- ~~七. 变压器的连接组别~~
- ~~八. 变压器的并联运行~~
- ~~九. 自藕变压器~~
- ~~一〇. 仪用互感器~~

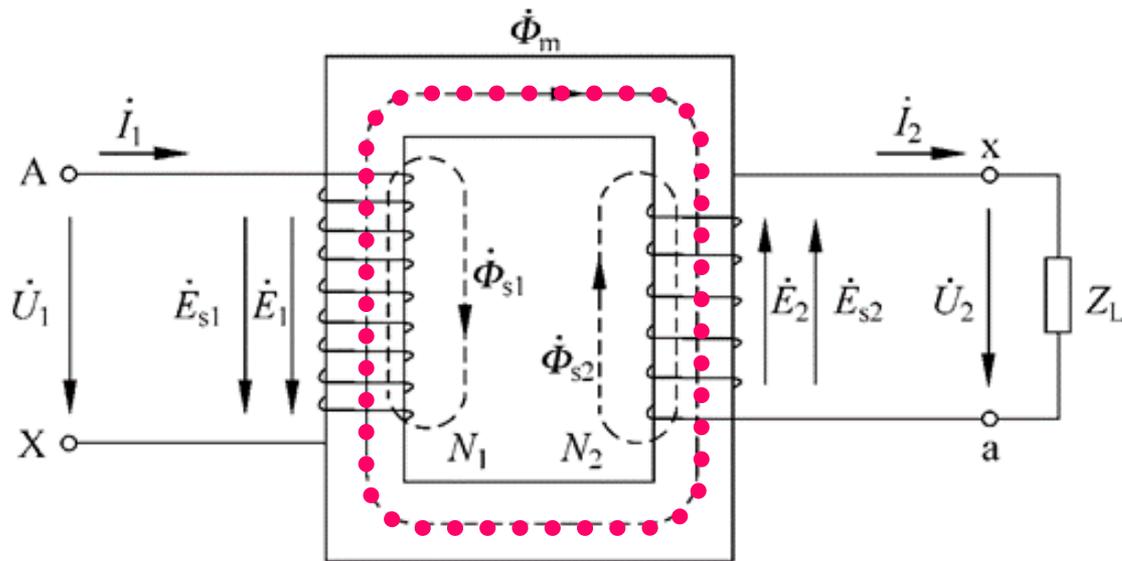


二. 变压器的空载运行

本节学习要点：

1. 理解变压器空载运行时的物理状况
2. 了解变压器的空载励磁电流
3. 掌握感应电动势和变压器变比
4. 掌握变压器空载运行时的电动势平衡方程
5. 掌握变压器空载运行时的等效电路

1. 变压器各电磁量正方向



$$\dot{U}_1 \quad A \rightarrow X$$

$$\dot{I}_1 \quad \text{与 } \dot{U}_1 \text{ 一致}$$

$$\dot{\Phi}_m \quad \text{与 } \dot{I}_1 \text{ 符合右手螺旋}$$

$$\dot{I}_2 \quad \text{与 } \dot{\Phi}_m \text{ 符合右手螺旋}$$

$$\left. \begin{matrix} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_{s1} \end{matrix} \right\} \text{与 } \dot{U}_1 \text{ 一致}$$

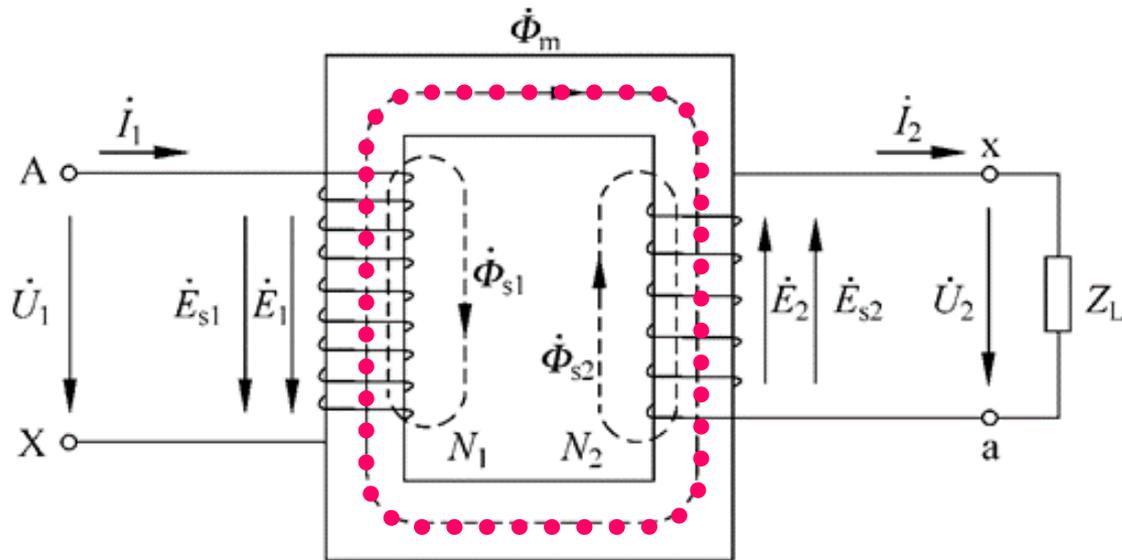
$$\left. \begin{matrix} \dot{E}_2 \\ \dot{E}_{s2} \end{matrix} \right\} \text{与 } \dot{I}_2 \text{ 一致}$$

$$\dot{U}_2 \quad x \rightarrow a$$

原边：电动机惯例 副边：发电机惯例

原边从电源吸收电功率，借助磁场的耦合及电磁感应作用传递到副边绕组，副边向负载供电。

1. 变压器各电磁量正方向



$U_1 \rightarrow I_1 \rightarrow \Phi_m$ (交变)

$$\begin{cases} e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} & e_1 \approx u_1 \\ e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} & e_2 \approx u_2 \end{cases} \Rightarrow \frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\dot{U}_1 \quad A \rightarrow X$$

$$\dot{I}_1 \quad \text{与 } \dot{U}_1 \text{ 一致}$$

$$\dot{\Phi}_m \quad \text{与 } \dot{I}_1 \text{ 符合右手螺旋}$$

$$\dot{I}_2 \quad \text{与 } \dot{\Phi}_m \text{ 符合右手螺旋}$$

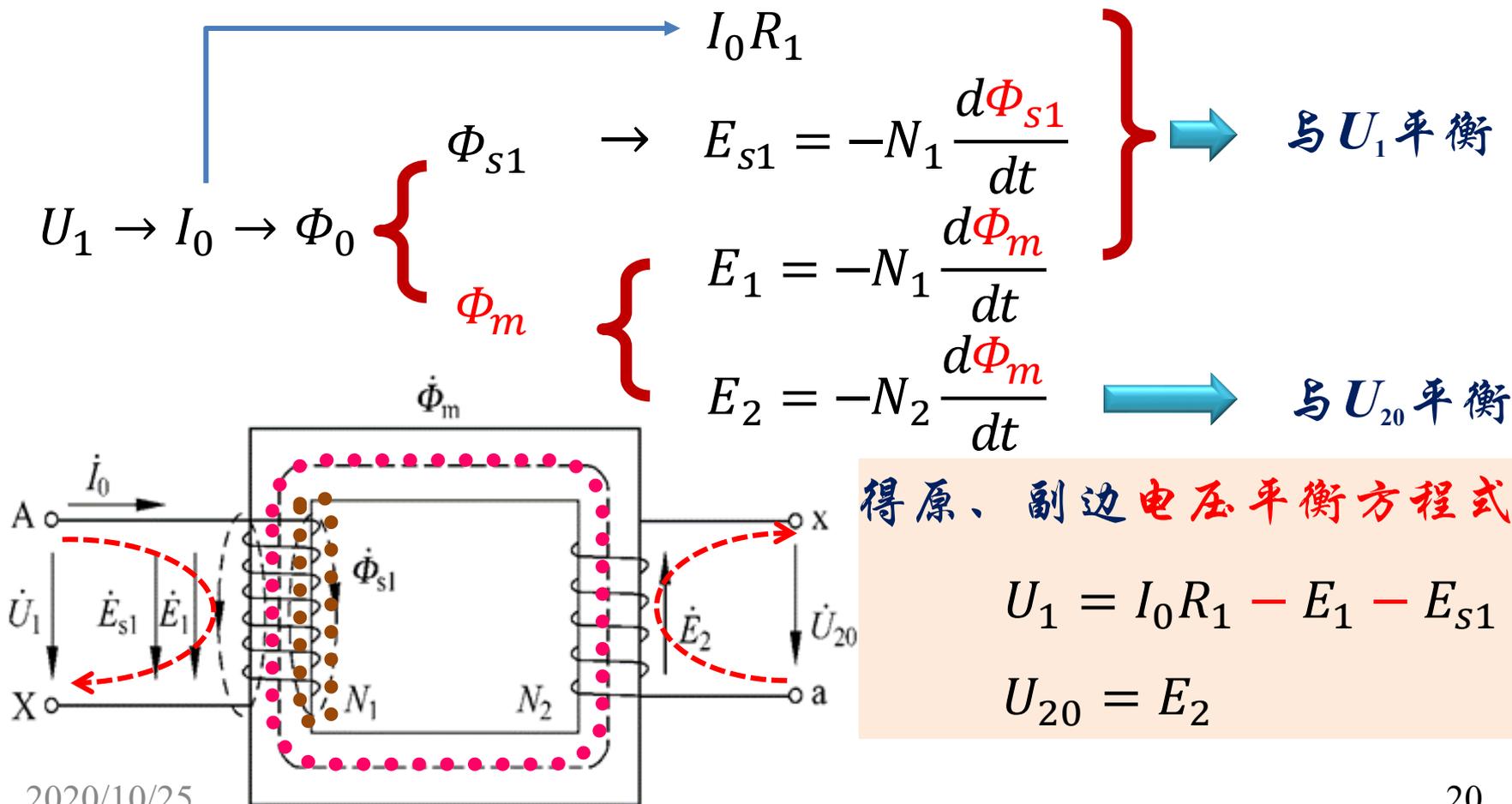
$$\left. \begin{matrix} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_{s1} \end{matrix} \right\} \text{与 } \dot{U}_1 \text{ 一致}$$

$$\left. \begin{matrix} \dot{E}_2 \\ \dot{E}_{s2} \end{matrix} \right\} \text{与 } \dot{I}_2 \text{ 一致}$$

$$\dot{U}_2 \quad x \rightarrow a$$

2. 变压器空载运行

空载运行： AX 接 U_{1N} ， ax 开路



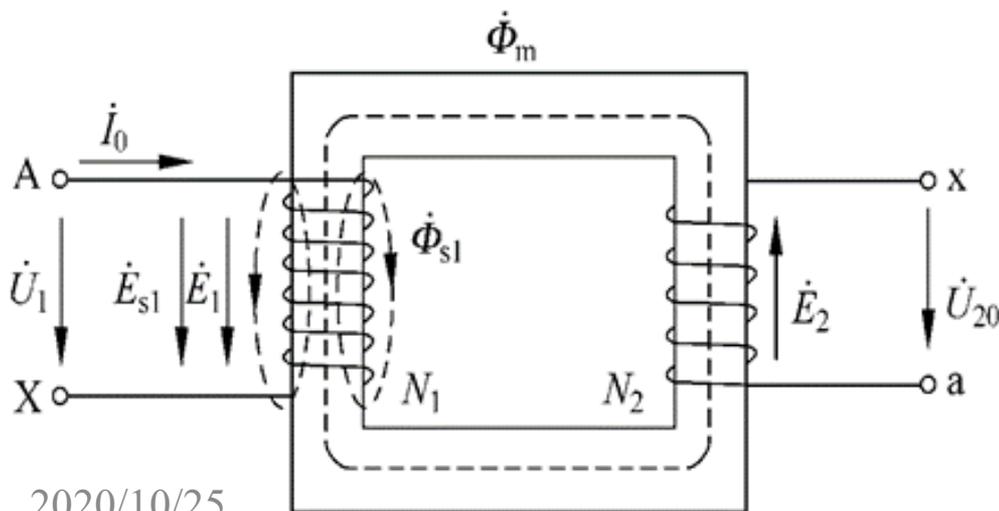
2. 变压器空载运行

主磁通与漏磁通

主磁通：同时链着一、二次绕组的磁通，用 Φ_m 表示。

漏磁通：只链一次绕组或二次绕组的磁通，用 Φ_{s1} 或 Φ_{s2} 表示。

当不考虑铁芯饱和时，磁通的瞬时值以电源频率随时间按正弦规律变化！



主磁通瞬时值：

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t$$

一次绕组漏磁通：

$$\Phi_{s1} = \Phi_{s1m} \sin \omega t$$



2. 变压器空载运行

主磁通感应电动势

主磁通瞬时值:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t$$

一次绕组主磁通感应电势瞬时值:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t = \omega N_1 \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$= E_{1m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$E_{1m} = \omega N_1 \Phi_m$ 一次绕组感应电势幅值

二次绕组主磁通感应电势瞬时值:

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = \omega N_2 \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$= E_{2m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$E_{2m} = \omega N_2 \Phi_m$ 二次绕组感应电势幅值



2. 变压器空载运行

主磁通感应电动势

主磁通瞬时值:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t$$

$$e_1 = \omega N_1 \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

相量表示法:

$$\dot{E}_1 = \frac{\dot{E}_{1m}}{\sqrt{2}} = -j \frac{\omega N_1}{\sqrt{2}} \dot{\Phi}_m = -j \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \dot{\Phi}_m = -j 4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m$$

有效值:

$$\dot{E}_2 = \frac{\dot{E}_{2m}}{\sqrt{2}} = -j \frac{\omega N_2}{\sqrt{2}} \dot{\Phi}_m = -j 4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m$$

变比:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m}{4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m} = \frac{N_1}{N_2}$$

2. 变压器空载运行

漏磁通感应电动势

一次绕组漏磁通感应电势瞬时值:

$$e_{s1} = -N_1 \frac{d\Phi_{s1}}{dt} = \omega N_1 \Phi_{s1} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = E_{s1m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$E_{s1m} = \omega N_1 \Phi_{s1} \quad \text{一次绕组感应电势幅值}$$

相量表示法:

$$\dot{E}_{s1} = \frac{\dot{E}_{s1m}}{\sqrt{2}} = -j \frac{\omega N_1}{\sqrt{2}} \dot{\Phi}_{s1} = -j4.44f N_1 \dot{\Phi}_{s1}$$

$$\dot{E}_{s1} = -j \frac{\omega N_1 \Phi_{s1}}{\sqrt{2}} \frac{I_0}{I_0} = -j\omega L_{s1} \dot{I}_0 = -jX_1 \dot{I}_0$$

感抗表示

一次绕组漏自感

$$L_{s1} = \frac{N_1 \Phi_{s1}}{\sqrt{2} I_0} = \frac{N_1 (\sqrt{2} I_0 N_1 \Lambda_{s1})}{\sqrt{2} I_0} = N_1^2 \Lambda_{s1}$$

漏磁导



一次绕组漏电抗: $X_1 = \omega L_{s1}$

2. 变压器空载运行

空载运行电压方程

一次绕组的电压方程：

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{s1} + \dot{I}_0 R_1 = -\dot{E}_1 + jX_1 \dot{I}_0 + \dot{I}_0 R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1$$

R_1 一次绕组电阻

$Z_1 = R_1 + jX_1$ 一次绕组漏阻抗

漏感电动势

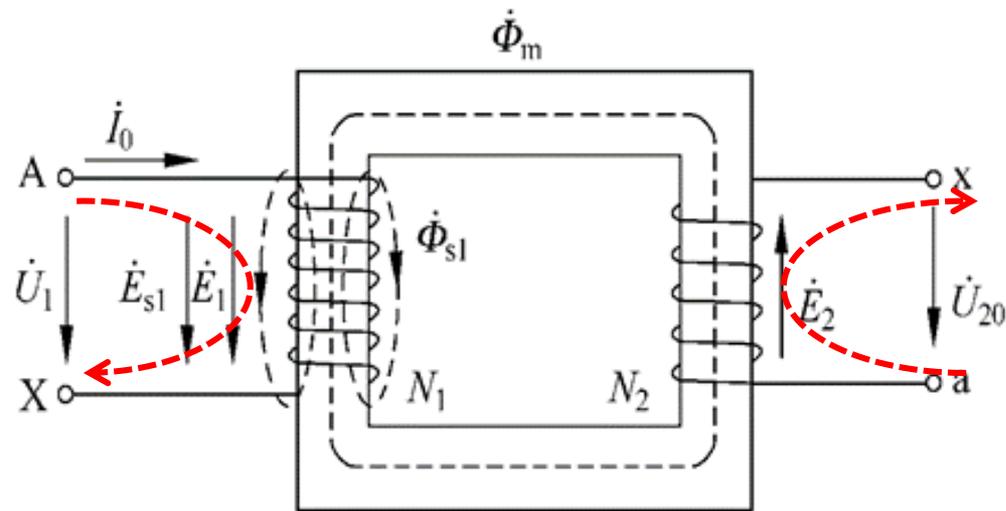
$$\dot{E}_{s1} = -jX_1 \dot{I}_0$$

二次绕组的电压方程：

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

空载忽略漏感压降： $U_1 \approx E_1$

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_{20}}$$



2. 变压器空载运行

励磁电流

定义：变压器空载运行时，初级绕组中的电流称空载电流，也称激磁电流，一方面用以建立空载磁场，另一方面要供给空载时的损耗。

i_0 { i_{0r} (磁化电流): i_0 中的无功分量，用于建立磁场，不消耗有功功率。相位上，方向与主磁通 Φ_m 同向。
 i_{0a} (铁损电流): i_0 中的有功分量，对应于铁耗，消耗有功功率。相位上，方向与 U_1 同向。

空载损耗

原边绕组上的铜耗

$$p_{cu1} = i_0^2 R_1$$

铁耗（磁滞、涡流）

$$p_{Fe}$$

$$p_{cu1} \ll p_{Fe}$$

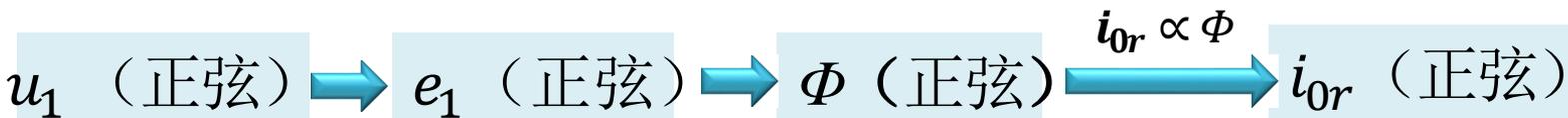
只考虑铁耗

2. 变压器空载运行

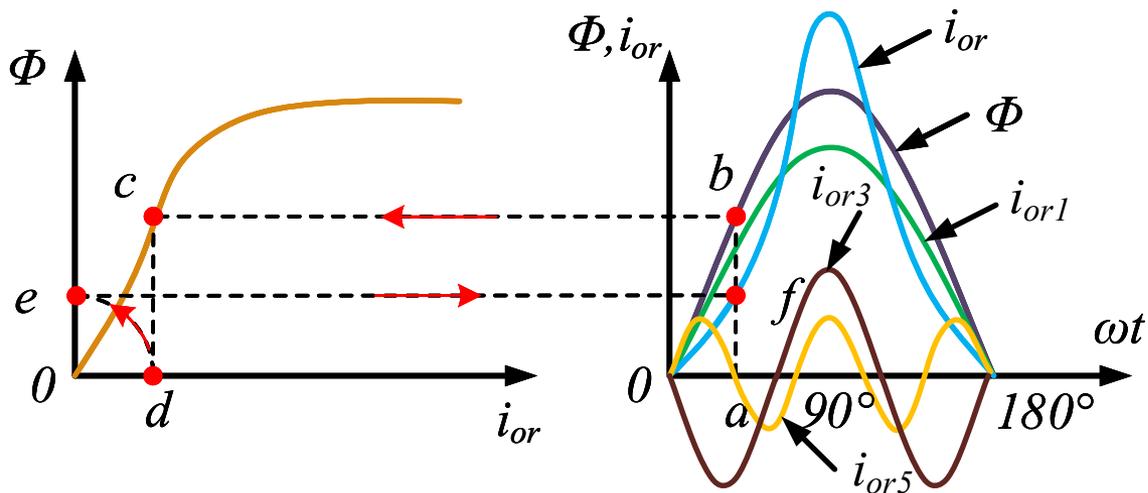
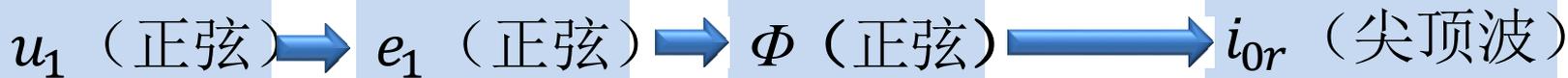
忽略空载损耗时的空载电流

忽略空载损耗时 $i_0 = i_{or}$ (磁化电流) 全部为 **无功电流**, 用来 **建立磁场**, 大小和波形取决于 **铁心的饱和程度**。

不饱和:



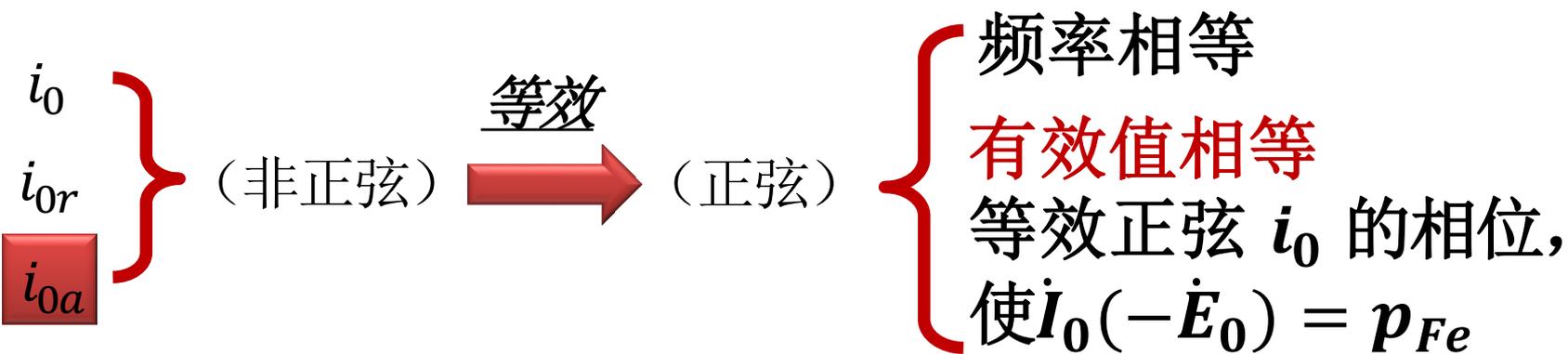
饱和:



2. 变压器空载运行

考虑空载损耗时的空载电流

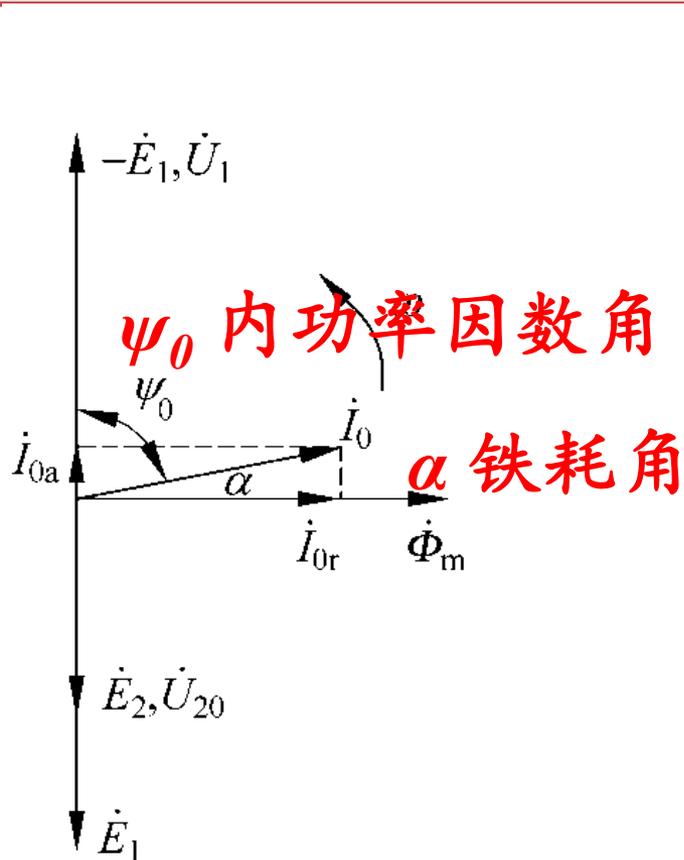
i_0
 $\left\{ \begin{array}{l} i_{0r}: i_0 \text{ 中的无功分量, 用于建立磁场。} \\ i_{0a}: i_0 \text{ 中的有功分量, 用以补偿铁心中的磁滞和涡流损耗。} \end{array} \right.$



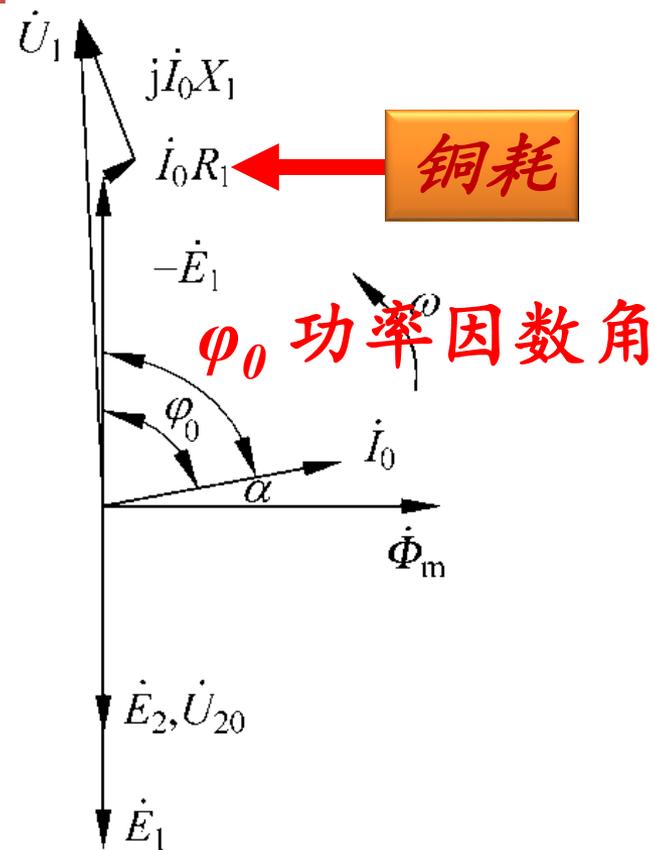
向电源吸收的有功功率

2. 变压器空载运行

☞ 变压器空载运行的相量图



(a)



(b)

2. 变压器空载运行

☞ 变压器空载运行的等效电路

\dot{E}_1 看成 i_{0r} 在电抗上的
的负压降:

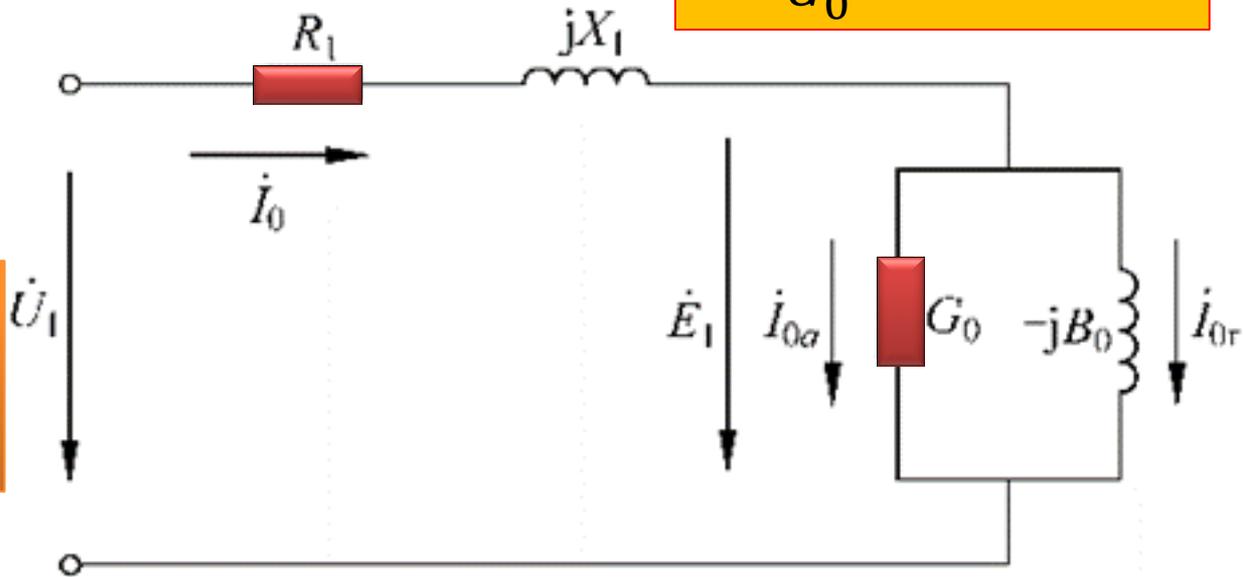
$$\dot{E}_1 = -j i_{0r} \frac{1}{B_0}$$

i_{0a} 超前 \dot{E}_1 π 角度, 用
负电阻压降表示:

$$\dot{E}_1 = -i_{0a} \frac{1}{G_0}$$

$I_0^2 R_1$ 表示铜损耗

$I_{0a}^2 \frac{1}{G_0}$ 表示铁损耗



变压器空载运行的并联等效电路

2. 变压器空载运行

☞ 变压器空载运行的等效电路

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_1 &= -j\dot{I}_{0r} \frac{1}{B_0} \\ \dot{E}_1 &= -\dot{I}_{0a} \frac{1}{G_0} \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_{0r} + \dot{I}_{0a} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \dot{I}_0 = (-\dot{E}_1)(G_0 - jB_0)$$

$$\Rightarrow (-\dot{E}_1) = \frac{\dot{I}_0}{G_0 - jB_0} = \dot{I}_0 \frac{G_0}{G_0^2 + B_0^2} + \dot{I}_0 \frac{jB_0}{G_0^2 + B_0^2}$$

$$\Rightarrow (-\dot{E}_1) = \dot{I}_0 R_m + j\dot{I}_0 X_m = \dot{I}_0 Z_m \quad \text{励磁阻抗}$$

铁损耗等效电阻
或励磁电阻

励磁电抗

2. 变压器空载运行

☞ 变压器空载运行的等效电路

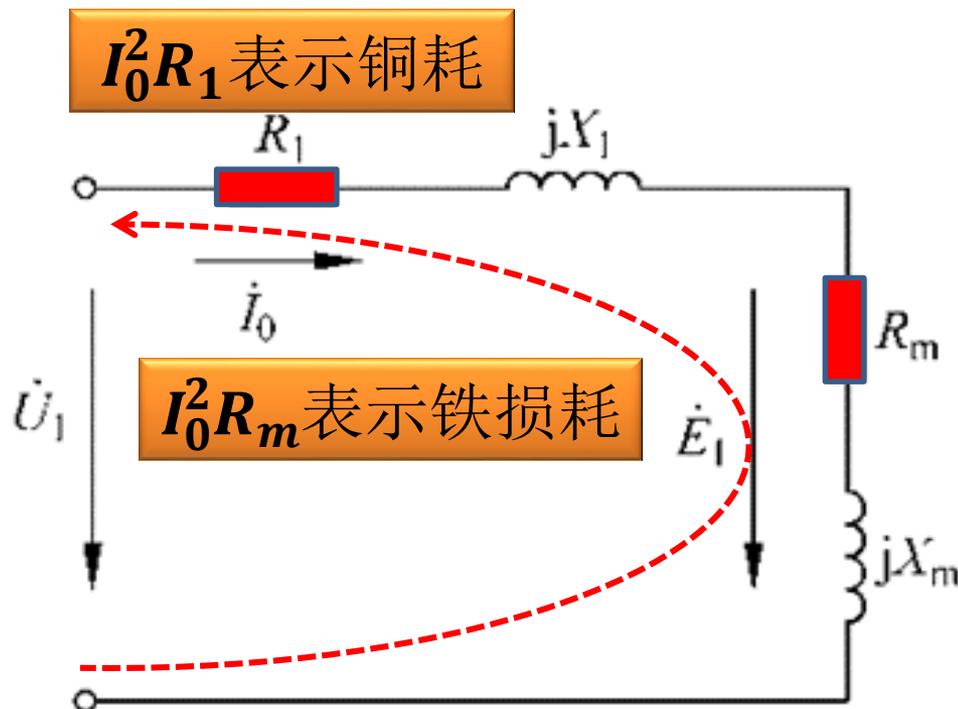
一次绕组的电压方程：

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

励磁阻抗

漏阻抗

$$Z_m \gg Z_1$$



变压器空载运行等效电路

例题5-1 一台三相电力变压器，Y/Y接法，额定容量 $S_N=100\text{ kVA}$ ，额定电压 $U_{1N}/U_{2N}=6000/400\text{V}$ ，额定电流 $I_{1N}/I_{2N}=9.62/144.3\text{A}$ ，每相参数：一次绕组漏阻抗： $Z_1=R_1+jX_1=(4.2+j9)\Omega$ ，励磁阻抗 $Z_m=R_m+jX_m=(514+j5526)\Omega$ 。计算：（1）励磁电流及其与额定电流的比值；（2）空载运行时的输入功率；（3）一次相电压、相电动势及漏阻抗压降，并比较它们的大小。

解题思路：

1) 求励磁电流， $I_0 = \frac{U_{1\phi}}{Z_1+Z_m}$ ，先求 $U_{1\phi}$

2) 求空载输入功率，按定义

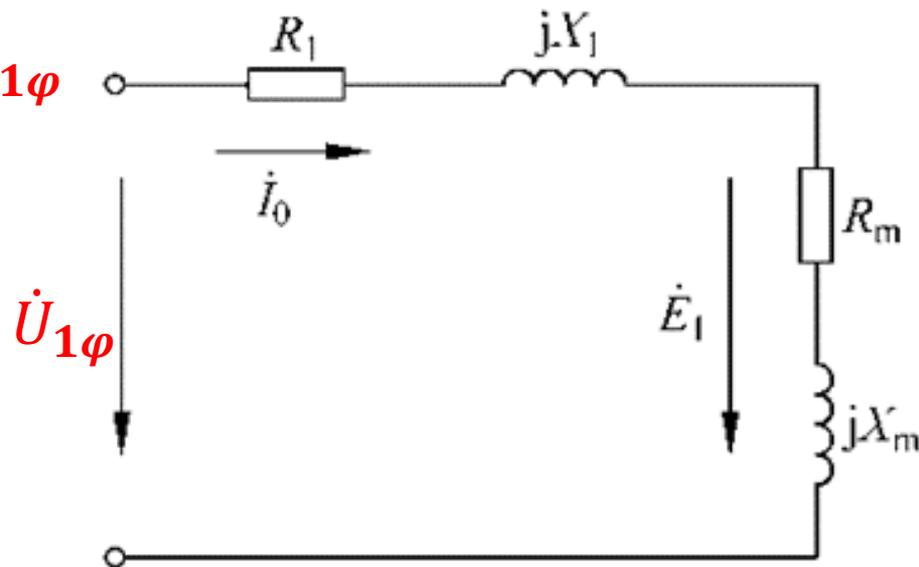
$$S_1 = \sqrt{3}U_{1N}I_0, P_1 = S_1 \cos\varphi,$$

$$Q_1 = S_1 \sin\varphi, \text{ 先求 } \varphi$$

3) 求一次相电压 $U_{1\phi}$ ，

$$\text{相电动势 } E_1 = I_0 Z_m,$$

$$\text{漏阻抗压降 } E_{1s} = I_0 Z_1$$



解：（1）励磁电流：

$$I_0 = \frac{U_{1\varphi}}{Z_1 + Z_m} = I_0 = \frac{U_{1N}/\sqrt{3}}{Z_1 + Z_m}$$
$$= \frac{6000}{\sqrt{3} \times (4.2+j9 + 514+j5526)} = \frac{6000}{\sqrt{3} \times 5559.2 \angle 84.65} = 0.623A$$
$$\frac{I_0}{I_{1N}} = \frac{0.623}{9.62} = 6.48\%$$

（2）空载运行时的输入功率：

视在功率： $S_1 = \sqrt{3}U_{1N}I_0 = \sqrt{3} \times 6000 \times 0.623 = 6474 \text{ VA}$

功率因数角： $\varphi = 84.65$

有功功率： $P_1 = S_1 \cos\varphi = 6474 \times \cos 84.65 = 604 \text{ W}$

无功功率： $Q_1 = S_1 \sin\varphi = 6474 \times \sin 84.65 = 6446 \text{ var}$



(3) 一次侧相电压: $U_{1\varphi} = U_{1N}/\sqrt{3} = 6000/\sqrt{3} = 3464 \text{ V}$

相电动势: $E_1 = I_0 Z_m = 0.623 \times \sqrt{514^2 + 5526^2} = 3458 \text{ V}$

每相漏阻抗电压降: $E_{1s} = I_0 Z_1 = 0.623 \times \sqrt{4.2^2 + 9^2} = 6.2 \text{ V}$

三者大小比较: $E_{1s} \ll E_1 \approx U_{1\varphi}$



- 一. 概述
- 二. 变压器的空载运行
- 三. 变压器负载运行**
- 四. 标么值
- 五. 变压器参数测定
- 六. 变压器的运行特性
- ~~七. 变压器的连接组别~~
- ~~八. 变压器的并联运行~~
- ~~九. 自藕变压器~~
- ~~一〇. 仪用互感器~~



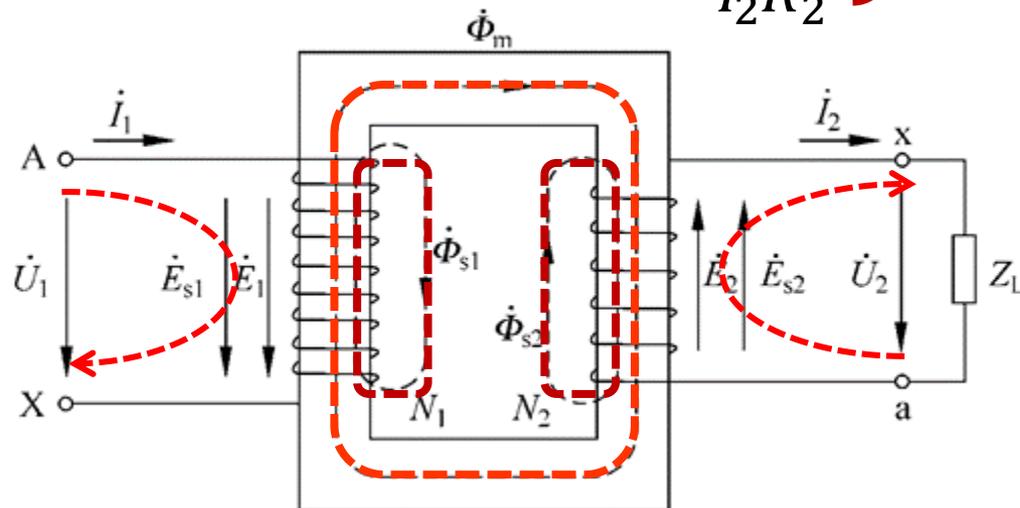
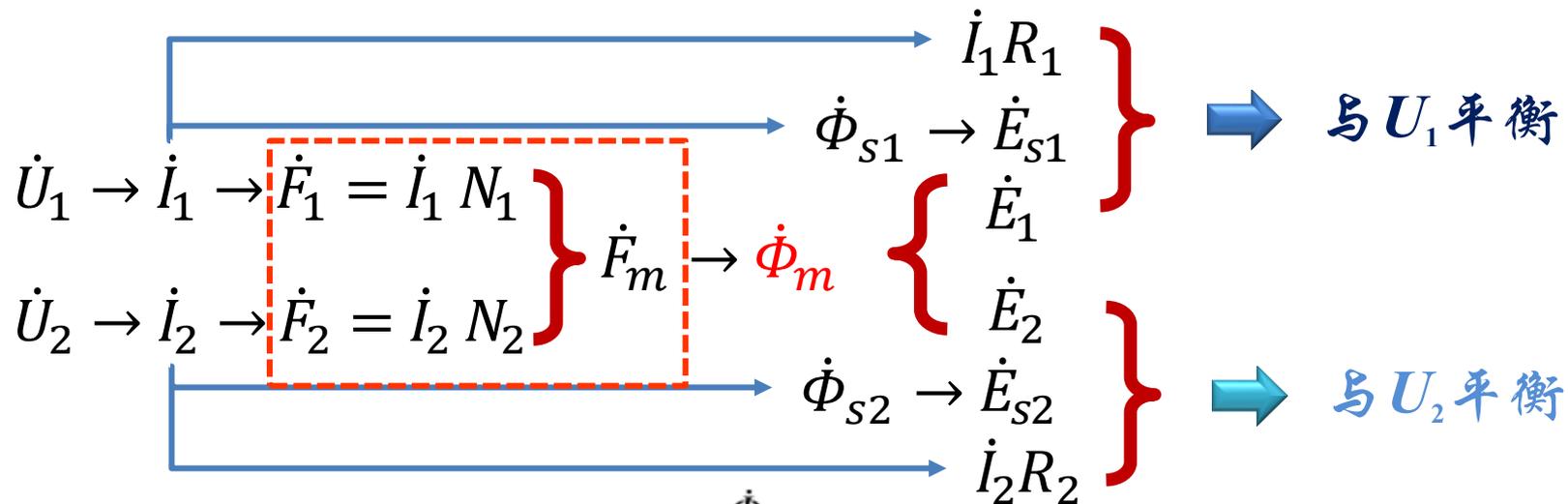
三. 变压器负载运行

本节学习要点：

1. 理解变压器负载运行时的电磁关系
2. 掌握变压器负载运行时的电动势平衡方程
3. 掌握变压器的(绕组)折算
4. 掌握变压器负载运行时的等效电路
5. 掌握变压器负载运行时的相量图

1. 负载时的磁通势及一次、二次电流关系

负载运行： AX接 U_{IN} ， ax接负载 Z_L , $I_2 \neq 0$



原边电动势平衡方程式：

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

$I_1 Z_1 \ll E_1$, 忽略不计

$$-E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m = const$$

$$\Phi_m = const$$

空载：

$$\dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1 \rightarrow \dot{\Phi}_0$$

负载：

$$\dot{F}_1 = \dot{I}_1 N_1$$

$$\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$$

$$\dot{F}_m = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 \rightarrow \dot{\Phi}_m$$

Why?

$$\dot{\Phi}_0 \approx \dot{\Phi}_m$$

$$\dot{F}_0 \approx \dot{F}_m$$

从空载到负载

不变： $\dot{\Phi}_m, \dot{F}_m$ ($\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = const$)

\dot{F}_2 出现后，如何保持 \dot{F}_m 不变？

改变： \dot{I}_1 ($\dot{I}_0 \rightarrow \dot{I}_1$)

$$\dot{I}_m \rightarrow \dot{F}_m$$

$$\dot{I}_{1L} \rightarrow \dot{F}_{1L} = -\dot{F}_2$$

\dot{F}_m 不变

抵消 \dot{F}_2 的作用

磁通势平衡方程式:

$$\dot{F}_1 = \dot{I}_1 N_1$$

$$\dot{F}_m = \dot{I}_m N_1$$

励磁分量

$$\dot{F}_{1L} = \dot{I}_{1L} N_1$$

负载分量

$$\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2 = -\dot{I}_{1L} N_1$$

抵消

电流平衡方程式:

$$\dot{F}_m = \dot{F}_1 + \dot{F}_2$$

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

励磁分量

负载分量

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

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + \left(-\dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1} \right) = \dot{I}_m + \left(-\frac{\dot{I}_2}{k} \right) = \dot{I}_m + \dot{I}_{1L}$$

功率:

$$\dot{U}_1 \dot{I}_{1L} \approx (-\dot{E}_1) \left(-\dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1} \right) = \dot{E}_2 \dot{I}_2$$

变比:

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

2. 负载时二次侧电压、电流的关系

漏磁通感应电动势

$$\dot{E}_{s2} = -j \frac{\omega N_2}{\sqrt{2}} \dot{\Phi}_{s2} = -j 4.44 f N_2 \dot{\Phi}_{s2}$$

感抗表示 $\dot{E}_{s2} = -j\omega L_{s2} \dot{I}_2 = -jX_2 \dot{I}_2$

二次绕组漏自感:

$$L_{s2} = \frac{N_2 \Phi_{s2}}{\sqrt{2} I_2} = N_2^2 \Lambda_{s2} \quad \text{漏磁导}$$

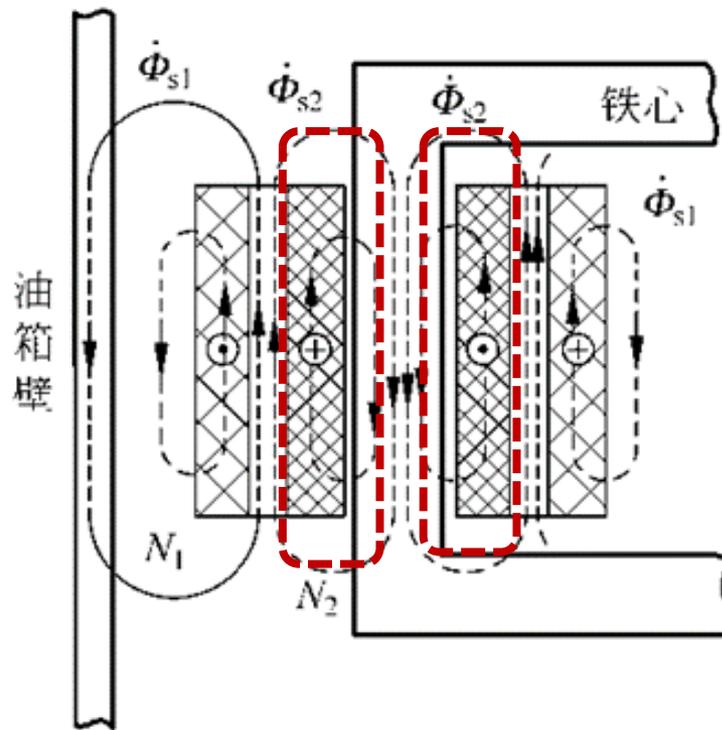
二次绕组漏电抗: $X_1 = \omega L_{s1}$

二次回路的电压方程:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{s2} - \dot{I}_2 R_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (R_2 + jX_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$$

R_2 二次绕组电阻

$Z_2 = R_2 + jX_2$ 二次绕组漏阻抗



3. 变压器的基本方程式

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

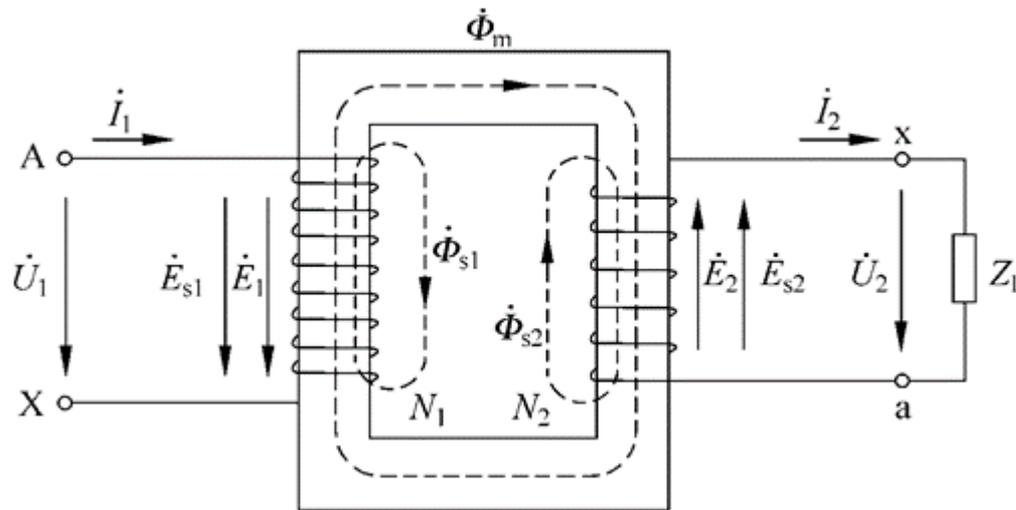
$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$$

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

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \frac{\dot{I}_2}{k}$$

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

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



作用：已知其中一些量，可以求出另一些物理量。

对于电力变压器，**k相差大**，原、副边数值相差大



折算

4. 折合算法

折合目的: 简化计算, 得到变压器的**等效电路**

折合方法: 把副边匝数变换成原边匝数

折合原则: 保持折算前后 \dot{F}_2 不变

保持折算前后
电磁本质不变

为什么?

变压器原、副边之间无直接电联系, 副边对原边的影响是通过磁路的耦合, 保持折算前后 \dot{F}_2 不变, 则副边对原边的影响不变, 因而折算对初级绕组中各物理量均无影响。

用一个匝数等于 N_1 的新的副边绕组代替实际的副边绕组。

次级电流换算关系

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

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

次级电动势换算关系

$$\frac{\dot{E}'_2}{\dot{E}_2} = \frac{-j4.44f N_1 \dot{\Phi}_m}{-j4.44f N_2 \dot{\Phi}_m} = \frac{N_1}{N_2}$$

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

次级阻抗换算关系

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



$$\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + \dot{I}'_2 Z'_2 = \dot{I}'_2 (Z'_L + Z'_2)$$

$$\dot{I}'_2 (Z'_L + Z'_2) = \dot{E}'_2 = k \dot{E}_2 = k \dot{I}_2 Z_2$$

$$\Rightarrow Z'_L + Z'_2 = \frac{\dot{E}'_2}{\dot{I}'_2} = \frac{k \dot{E}_2}{\frac{\dot{I}_2}{k}} = k^2 \frac{\dot{E}_2}{\dot{I}_2}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} Z'_L = k^2 Z_L & (R'_L = k^2 R_L, X'_L = k^2 X_L) \\ Z'_2 = k^2 Z_2 & (R'_2 = k^2 R_2, X'_2 = k^2 X_2) \end{cases}$$

只改变大小，不改变相位和阻抗角

端电压换算关系

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 = k \dot{E}_2 - \frac{\dot{I}_2}{k} \cdot k^2 Z_2 = k(\dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2) = k \dot{U}_2$$

结论

物理量

电压、电动势

电流

阻抗

折算值/原值

k

$1/k$

k^2

折算后基本方程组

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

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

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = -j4.44f N_1 \dot{\Phi}_m$$

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

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

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

折算前



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

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

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

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \frac{\dot{I}_2}{k}$$

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

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



折算前后副边功率关系

视在功率:

$$S_2 = m\dot{E}'_2\dot{I}'_2 = mk\dot{E}_2 \cdot \frac{\dot{I}_2}{k} = m\dot{E}_2 \cdot \dot{I}_2$$

折算前后
功率传递关系不变

有功功率输出:

$$P_2 = m\dot{U}'_2\dot{I}'_2 \cos \varphi'_2 = m \cdot k\dot{U}_2 \cdot \frac{\dot{I}_2}{k} \cos \varphi_2 = m\dot{U}_2\dot{I}_2 \cos \varphi_2$$

无功功率输出:

$$Q_2 = m\dot{U}'_2\dot{I}'_2 \sin \varphi'_2 = m \cdot k\dot{U}_2 \cdot \frac{\dot{I}_2}{k} \sin \varphi_2 = m\dot{U}_2\dot{I}_2 \sin \varphi_2$$

铜耗:

$$p_{cu2} = m\dot{I}'_2{}^2 R'_2 = m \cdot \frac{\dot{I}_2^2}{k^2} k^2 R_2 = m\dot{I}_2^2 R_2$$

5. 变压器负载运行时的等效电路

折算后基本方程组

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

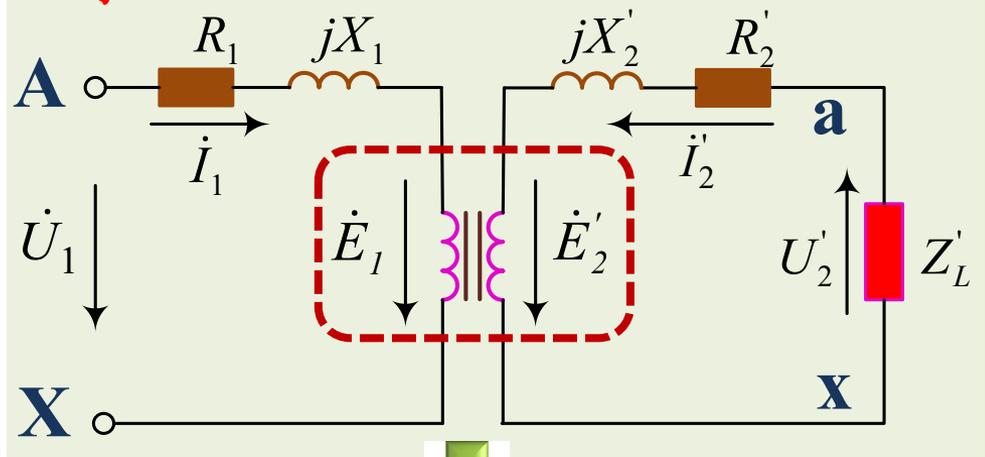
$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = -j4.44f N_1 \dot{\Phi}_m$$

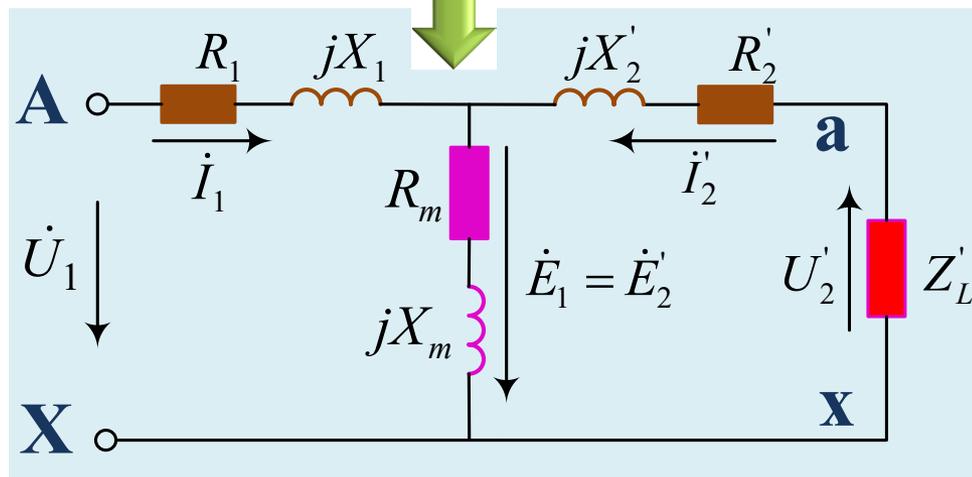
$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2$$

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

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



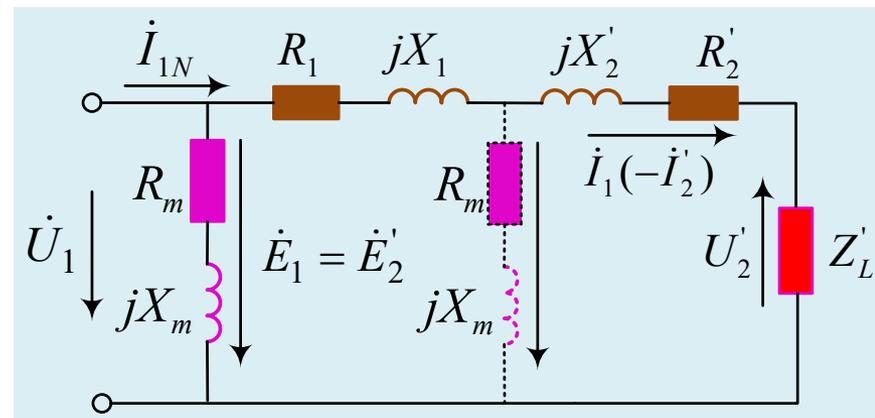
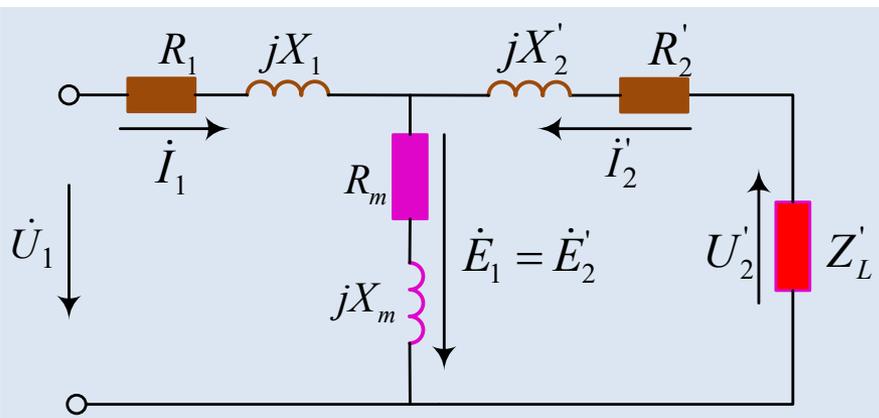
T形等效电路



由AX端看进去的等效阻抗:

$$Z_d = Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z'_2 + Z'_L}}$$

Γ形等效电路



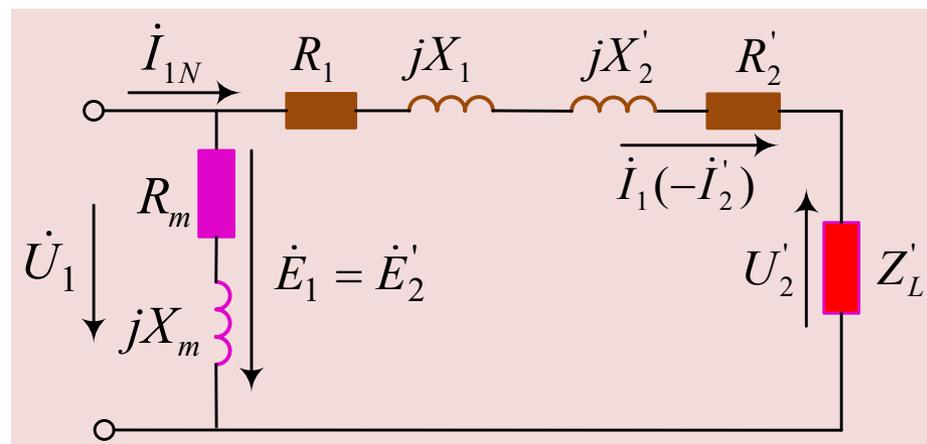
实际电力变压器中

$$Z_m \gg Z_1 \Rightarrow I_1 \gg I_m \Rightarrow I_1 Z_1 = (I_0 - I_2') Z_1 = \overset{\text{可忽略}}{I_0 Z_1} - I_2' Z_1$$

即认为 I_0 不流经 Z_1 ，可将激磁支路移至电源端，**简化计算。**

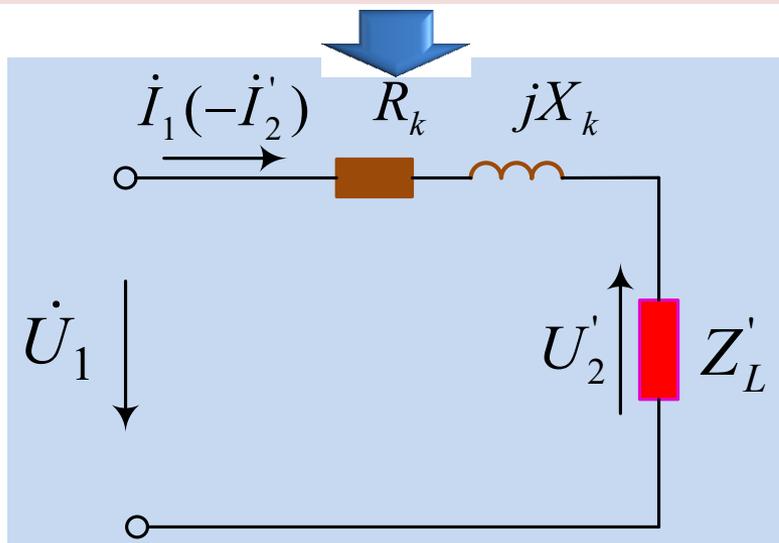
简化等效电路

在T形等效电路中，由于 $I_{1N} \gg I_m$ ，忽略 I_m ，得简化等效电路。



注意

简化等效电路常用于负载和短路运行的分析，空载运行时误差大不能采用。



$$R_k = R_1 + R_2'$$

$$X_k = X_1 + X_2'$$

$$Z_k = R_k + jX_k$$

稳态短路电流:

$$I_k = \frac{U_1}{Z_k}$$



例题5-2 一台三相电力变压器，额定容量 $S_N=750 \text{ kVA}$ ，额定电压 $U_{1N}/U_{2N}=10000/400\text{V}$ ，Y/Y接法。已知每相短路阻抗 $Z_k=R_k+jX_k=(1.4+j6.48)\Omega$ 。该变压器一次绕组接额定电压，二次绕组接三相对称负载运行，负载为Y接法，每相负载阻抗为 $Z_L=R_L+jX_L=(0.2+j0.07)\Omega$ ，计算：（1）变压器一次、二次侧电流；（2）二次电压；（3）输入及输出的有功功率和无功功率；（4）效率。

解题思路：

1) 求一次电流，已知 $U_1=U_{1N\phi}$ ，

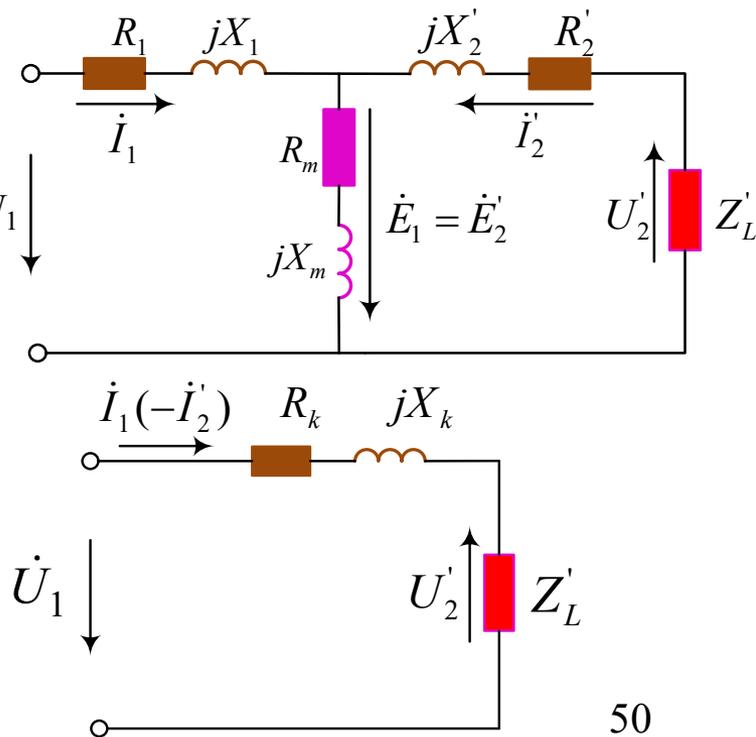
先求每相总阻抗： $Z_d = Z_1 + 1/\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z'_2+Z'_L}$

求 $Z'_L = k^2 Z_L$ ，先求 $k = U_{1\phi}/U_{2\phi} = U_{1N}/U_{2N}$

再求， $I_2 = kI_1$

2) 求二次电压（线电压）： $U_2 = \sqrt{3}I_2Z_L$

3) 求输入输出功率，按三相功率定义





输入有功功率： $P_1 = \sqrt{3}U_{1N}I_1\cos\varphi_1$

输入无功功率： $Q_1 = \sqrt{3}U_{1N}I_1\sin\varphi_1$

输入有功功率： $P_2 = \sqrt{3}U_2I_2\cos\varphi_2$

输入无功功率： $Q_2 = \sqrt{3}U_2I_2\sin\varphi_2$

其中， φ_1 为每相总阻抗 Z_d 的阻抗角， φ_2 为每相阻抗 Z_L 的阻抗角



解：（1）变比：

$$k = \frac{U_{1\varphi}}{U_{2\varphi}} = \frac{U_{1N}/\sqrt{3}}{U_{2N}/\sqrt{3}} = \frac{10000/\sqrt{3}}{400/\sqrt{3}} = 25$$

负载阻抗： $Z'_L = k^2 Z_L = 25^2 \times (0.2 + j0.07) = 125 + j43.75$

从一次侧看入每相总阻抗：

$$Z = Z_k + Z'_L = 126.4 + j50.23 = 136\angle 21.67^\circ \Omega$$

一次电流： $I_1 = U_{1\varphi}/Z = 1000/\sqrt{3}/136 = 42.45 \text{ A}$

二次电流： $I_2 = kI_1 = 25 \times 42.45 = 1061.25 \text{ A}$

（2）二次电压（线电压）：

$$U_2 = \sqrt{3} I_2 Z_L = \sqrt{3} \times 1061.25 \times (0.2 + j0.07) = \sqrt{3} \times 1061.25 \times 0.212\angle 19.29^\circ = 389.7 \text{ V}$$



(3) 一、二次侧功率因数角： $\varphi_1 = 21.67$ 、 $\varphi_2 = 19.29$

输入有功功率： $P_1 = \sqrt{3}U_{1N}I_1\cos\varphi_1 = 683.8 \times 10^3 \text{ W}$

输入无功功率： $Q_1 = \sqrt{3}U_{1N}I_1\sin\varphi_1 = 271.5 \times 10^3 \text{ var}$

输入有功功率： $P_2 = \sqrt{3}U_2I_2\cos\varphi_2 = 673.3 \times 10^3 \text{ W}$

输入无功功率： $Q_2 = \sqrt{3}U_2I_2\sin\varphi_2 = 236.6 \times 10^3 \text{ var}$

(4) 效率：

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{673.3 \times 10^3}{683.8 \times 10^3} = 98.48\%$$



例题5-3 某台三相电力变压器： $S_N=600 \text{ kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N}=10000/400\text{V}$ ， Δ/Y 接法，短路阻抗 $Z_k=(1.8+j5)\Omega$ 。二次带Y接法三相负载，每相负载阻抗为 $Z_L=(0.3+j0.1)\Omega$ ，计算：（1）一次电流 I_1 及其与额定电流 I_{1N} 的百分比；（2）二次电流 I_2 及其与额定电流 I_{2N} 的百分比；（3）二次电压 U_2 及其与额定电压 U_{2N} 相比降低的百分值；（4）变压器输出容量。

解题思路：

1) 先求相总阻抗： $Z_d = Z_k + Z'_L$

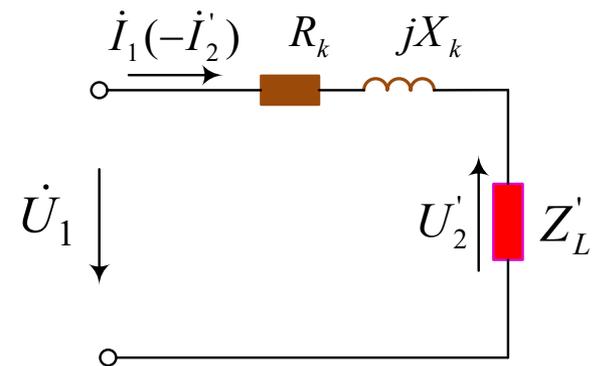
求 $Z'_L = k^2 Z_L$ ，先求 $k = U_{1\phi}/U_{2\phi} = U_{1N}/U_{2N}/\sqrt{3}$

求一次侧相电流， $I_{1\phi} = U_{1N}/Z_d$ ， $I_1 = \sqrt{3}I_{1\phi}$

2) 求二次侧线电流： $I_2 = kI_{1\phi}$

3) 求二次侧电压： $U_2 = \sqrt{3} \times I_2 Z_L$

4) 变压器输出容量： $S_2 = \sqrt{3}U_2 I_2$





解：（1）变比：

$$k = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}/\sqrt{3}} = \frac{10000}{400/\sqrt{3}} = 43.3$$

负载阻抗： $Z'_L = k^2 Z_L = 43.3^2 \times (0.3 + j0.1) = 562.5 + j 87.5$

从一次侧看入每相总阻抗：

$$Z = Z_k + Z'_L = 564.3 + j 92.5 = 596.23 \angle 18.84^\circ \Omega$$

一次侧电流：

$$I_1 = \frac{\sqrt{3} U_{1N}}{Z} = \frac{\sqrt{3} \times 10000}{596.23} = 29.05 \text{ A}$$

一次侧额定电流：

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}} = \frac{600 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10000} = 34.64 \text{ A}$$

比值： $\beta_1 = I_1 / I_{1N} = 29.05 / 34.64 = 83.86\%$



(2) 二次侧电流: $I_2 = kI_{1\varphi} = kI_1/\sqrt{3} = 29.05 \times 34.64/\sqrt{3} = 726.23 \text{ A}$

二次侧额定电流:

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{600 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} = 866.05 \text{ A}$$

比值: $\beta_2 = I_2/I_{2N} = 726.23/866.05 = 83.86\%$

(3) 二次侧电压: $U_2 = \sqrt{3} \times I_2 Z_L = \sqrt{3} \times 726.23 \times (0.3 + j0.1) = \sqrt{3} \times 726.23 \times 0.316 \angle 18.43 = 397.47 \text{ V}$

二次侧电压降: $\Delta U = U_{2N} - U_2 = 400 - 397.47 = 2.53 \text{ V}$

二次侧电压降低百分值:

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_{2N}} = \frac{2.53}{400} = 0.63\%$$

(4) 变压器输出容量: $S_2 = \sqrt{3}U_2 I_2 = \sqrt{3} \times 397.47 \times 726.23 = 500 \text{ kVA}$

例题5-4 某车间采用两台单相变压器串联供机床照明电。第I台变压器额定数据为20kVA，240V/120V，短路阻抗 $Z_{kI} = (0.15 + j0.25)\Omega$ 。第II台变压器额定数据为20kVA，120V/24V，短路阻抗 $Z_{kII} = (0.04 + j0.06)\Omega$ 。负载为电灯，每盏灯100W（24V）。当电源电压为240V，150盏灯照明时，求电流 I_1 、 I_2 、 I_3 ， U_3 ，与空载比较 U_3 下降值，总输入和总输出有功功率，总效率。

解题思路：

先求一次侧看入总阻抗：

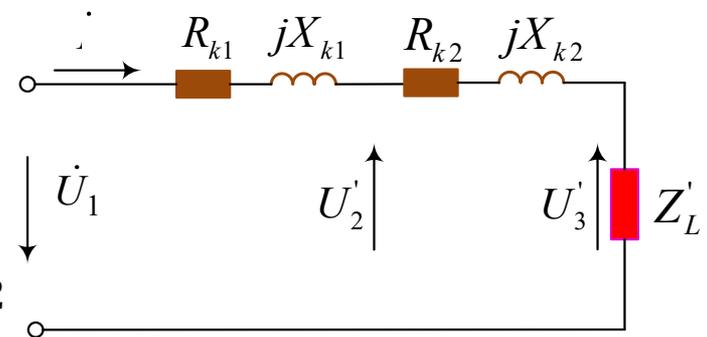
$$Z = Z_{kI} + k_I^2 Z_{kII} + k_I^2 k_{II}^2 Z_L$$

输入电流： $I_1 = U_1/Z$ ， $I_2 = k_I I_1$ ， $I_3 = k_{II} I_2$

输出电压： $U_3 = I_3 Z_L$

总输入功率： $P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi$ ， φ 为每相阻抗 Z_L 的阻抗角

总输出功率： $P_3 = U_3 I_3$





解：变比： $k_I = U_1/U_2 = 240/120 = 2$ ； $k_{II} = U_2/U_3 = 120/24 = 5$

负载阻抗：

$$Z_L = \frac{24^2}{100 \times 150} = 38.4 \times 10^{-3} \Omega$$

从一次侧看入总阻抗：

$$Z = Z_{kI} + k_I^2 Z_{kII} + k_I^2 k_{II}^2 Z_L = 4.15 + j0.49 = 4.179 \angle 6.73^\circ$$

各绕组电流：

$$I_1 = \frac{U_1}{Z} = \frac{240}{4.179} = 57.43 \text{ A}, \quad I_2 = 2I_1 = 114.86 \text{ A}, \quad I_3 = 5I_2 = 574.3 \text{ A}$$

输出电压： $U_3 = I_3 Z_L = 574.3 \times 38.4 \times 10^{-3} = 22.05 \text{ V}$

与空载比较 U_3 下降值： $\Delta U_3 = U_{3N} - U_3 = 24 - 22.05 = 1.95 \text{ V}$

$$\Delta U_3 \% = \frac{\Delta U_3}{U_{3N}} = \frac{1.95}{24} = 8.13\%$$



总输入功率： $P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi = 240 \times 57.43 \times \cos 6.73^\circ = 13688W$

总输出功率： $P_3 = U_3 I_3 = 22.05 \times 574.3 = 12663W$

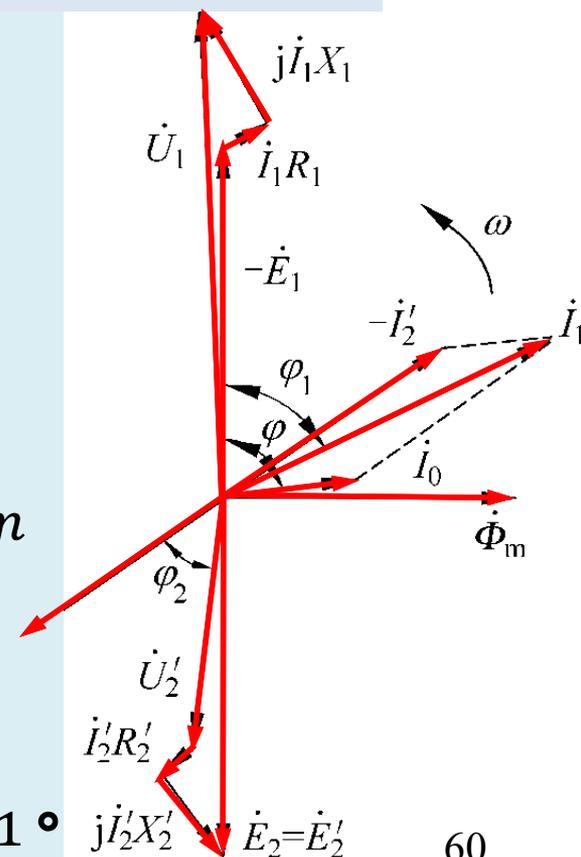
效率：

$$\eta = \frac{P_3}{P_1} = \frac{12663}{13688} = 92.51\%$$

6. 相量图

负载呈感性 给定 \dot{U}_2 , \dot{I}_2 , $\cos \varphi_2$, k 及各参数, 画图步骤:

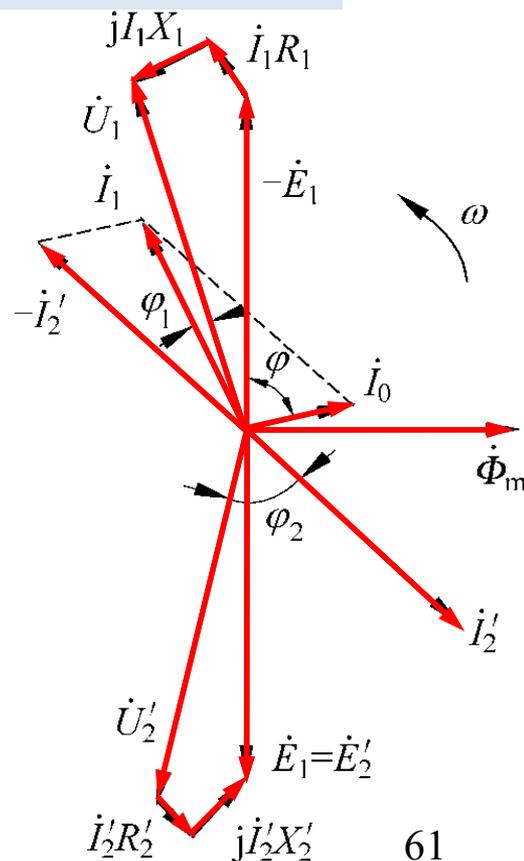
- ① 画 \dot{U}_2' 和 \dot{I}_2' 其夹角 φ_2 ;
- ② 在 \dot{U}_2' 上, 加上 $\dot{I}_2' R_2'$ 和 $j\dot{I}_2' X_2'$, 得出 \dot{E}_2' ;
- ③ $\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$;
- ④ 画出领先 \dot{E}_1 90° 的 $\dot{\Phi}_m$;
- ⑤ 根据 $\dot{I}_0 = -\dot{E}_1 / Z_m$, 画出 \dot{I}_0 , 领先 $\dot{\Phi}_m$ 一个**铁耗角**;
- ⑥ 根据 $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2'$, 画出 \dot{I}_1 ;
- ⑦ 画出 $-\dot{E}_1$, 加上 $\dot{I}_1 R_1$ 和 $j\dot{I}_1 X_1$, 得出 \dot{U}_1 。



6. 相量图

负载呈容性 给定 \dot{U}_2 , \dot{I}_2 , $\cos \varphi_2$, k 及各参数, 画图步骤:

- ① 画 \dot{U}_2' 和 \dot{I}_2' 其夹角 φ_2 ;
- ② 在 \dot{U}_2' 上, 加上 $\dot{I}_2' R_2'$ 和 $j\dot{I}_2' X_2'$, 得出 \dot{E}_2' ;
- ③ $\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$;
- ④ 画出领先 \dot{E}_1 90° 的 $\dot{\Phi}_m$;
- ⑤ 根据 $\dot{I}_0 = -\dot{E}_1 / Z_m$, 画出 \dot{I}_0 , 领先 $\dot{\Phi}_m$ 一个**铁耗角**;
- ⑥ 根据 $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2'$, 画出 \dot{I}_1 ;
- ⑦ 画出 $-\dot{E}_1$, 加上 $\dot{I}_1 R_1$ 和 $j\dot{I}_1 X_1$, 得出 \dot{U}_1 。



简化相量图

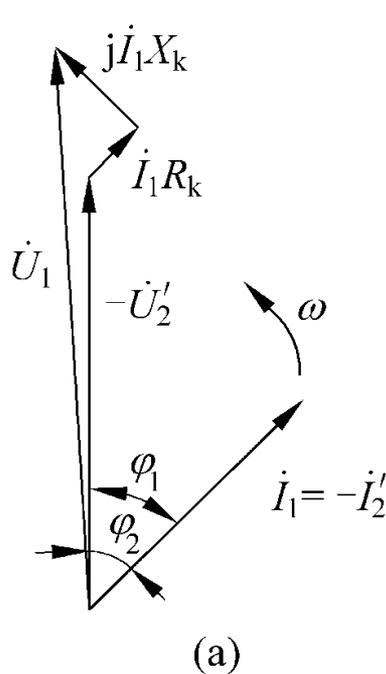
依据: 简化等效电路

$$U_2' = I_2' Z_L', \quad I_1 = -I_2', \quad U_1 = -U_2' + I_1(R_k + jX_k) = -U_2' + I_1 Z_k$$

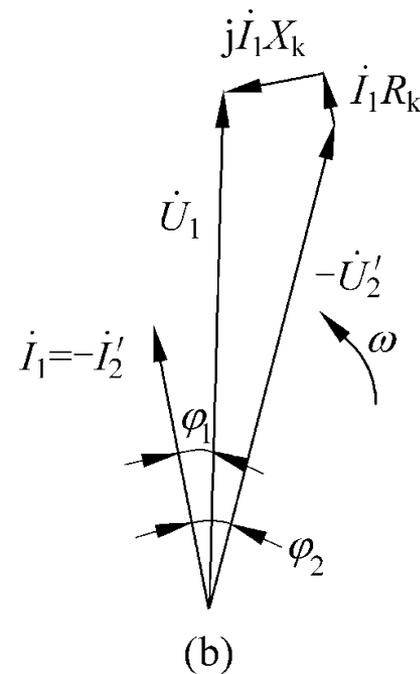
忽略 I_0

步骤:

- ① 画 $-U_2'$ 和 $-I_2'$, 其夹角 φ_2 ;
- ② 根据 $I_1 = -I_2'$, 在 $-U_2'$ 上, 加上 $I_1 R_k'$ 和 $jI_1 X_k'$, 得出 U_1 ;



负载呈感性



负载呈容性



作业： 5.1 ， 5.2， 5.4