



自动控制实践I

变压器

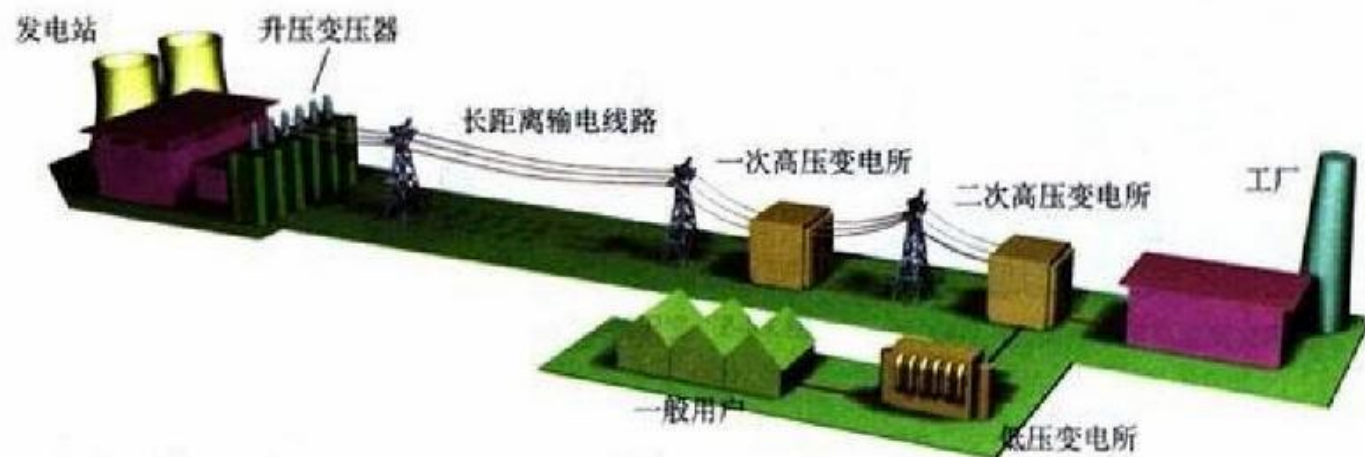
哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 解伟男

目 录

- 1 变压器概述
 - 1.1 变压器概念
 - 1.2 变压器结构
 - 1.1 变压器分类
 - 1.1 变压器用途
- 2 变压器的铭牌数据
- 3 变压器原理
 - 3.1 变压器基本原理
 - 3.2 变压器空载运行原理
 - 3.3 变压器负载运行原理
- 4 变压器等效电路
 - 4.1 变压器绕组折算
 - 4.2 变压器等效电路
- 5 特种变压器



1 变压器概述



- 从电力系统来讲，变压器是一种主要设备。在输电过程中电压必须进行调整。

1 变压器概述

生活中各种电压的交流或直流电			
电器	额定工作电压	电器	额定工作电压
机床照明灯	36V	扫描仪	12V
手机充电器	4.2V, 4.4V, 4.5V	防身器	3000V
家用电器	220V	收音机	6V, 9V, 12V
大型发电机	几万伏	显像管	10 几 kV

我们国家民用统一供电均为**220V**，如何使这些额定电压不是**220V**的电器设备正常工作呢？

1 变压器概述



发电站升压变压器



电力变压器



电源变压器



调压器



控制变压器



旋转变压器

1 变压器概述

○ 变压器的概念

- n 变压器(Transformer)是利用电磁感应的原理来改变交流电压的装置
- n 可以改变电压、电流、相数，但是不能改变频率
- n 其工作原理与异步电机工作原理相似，属于静止的电机

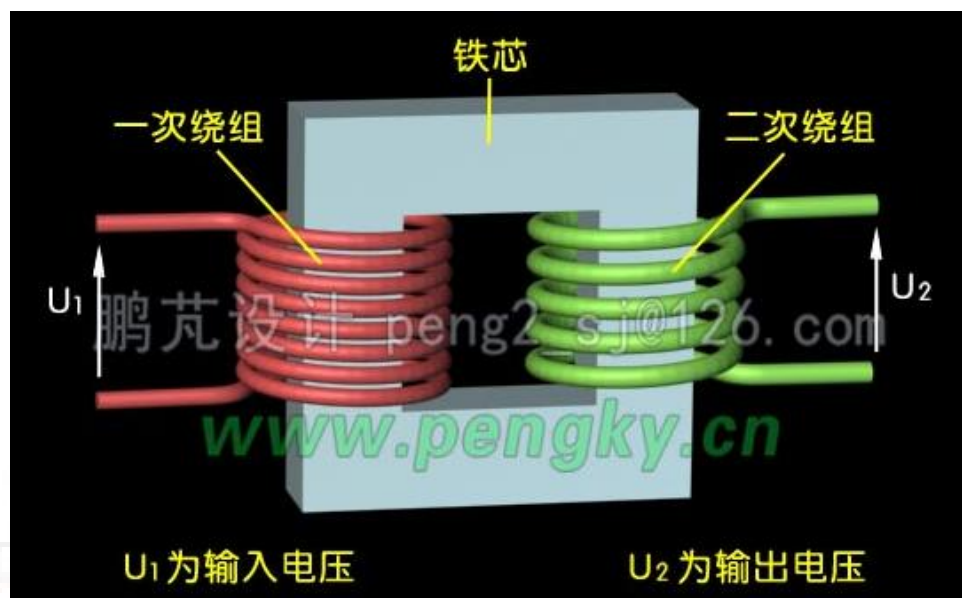
○ 电力变压器的用途

- n 经济的输送电能：高压输电减少输电线路上电能损耗
- n 合理的分配电能：按用户区域电压等级和负荷需求供电
- n 安全的使用电能：变压器配备多种保护措施

1 变压器概述

○ 变压器的结构

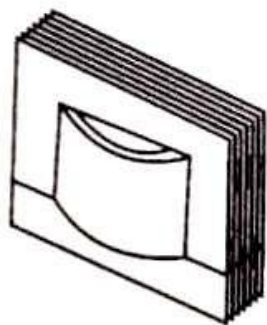
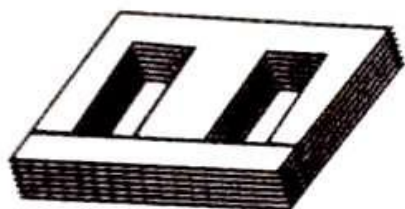
- n 变压器由**绕组**和**铁心**两部分组成
- n 原绕组(初级绕组、一次绕组)和副绕组(次级绕组、二次绕组)
- n 铁心的目的是增加磁密和磁通，增加原绕组和副绕组之间的互感
- n 普通变压器铁心采用硅钢或其他磁导率高的合金材料
- n 为了减小涡流损耗，变压器铁心一般用厚**0.35mm**或**0.5mm**的硅钢片叠成，片间要有一定绝缘。
- n 高频变压器铁心采用铁氧体。



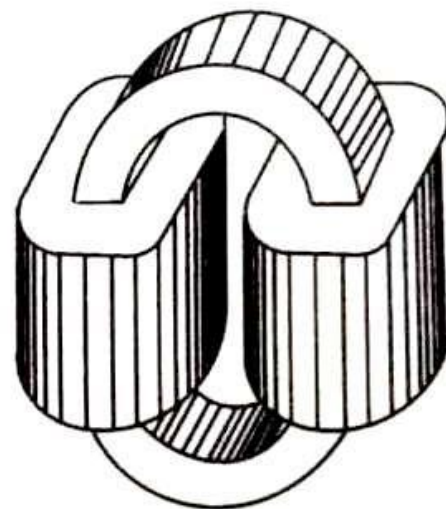
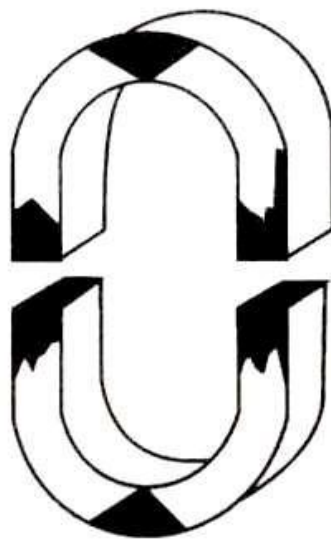
1 变压器概述

○ 变压器的结构

n 变压器的铁心有E型铁心和C型铁心



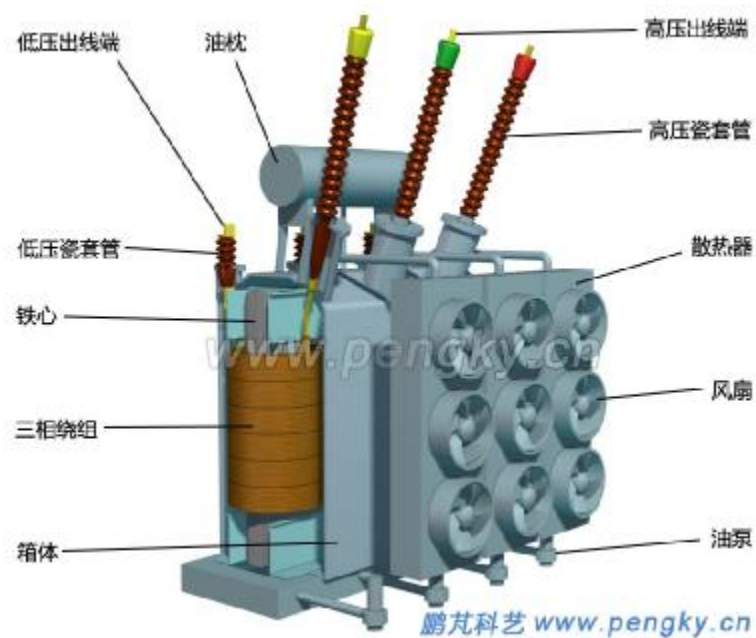
(a) E形铁心与E形变压器



(b) C形铁心与环形变压器

1 变压器概述

○ 变压器的结构



1 变压器的分类

○ 按用途分：

- n 电力变压器——在电力系统中使用的用于升高电压或降低电压的变压器
- n 特种变压器——根据冶金、矿山、化工、交通等部门的具体要求而设计制造的专用变压器。
- n 仪用变压器——电压、电流互感器，旋转变压器。

○ 按相数分：

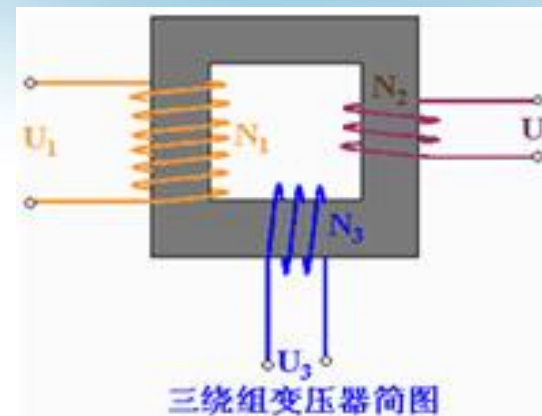
- n 单相变压器
- n 三相变压器



1 变压器的分类

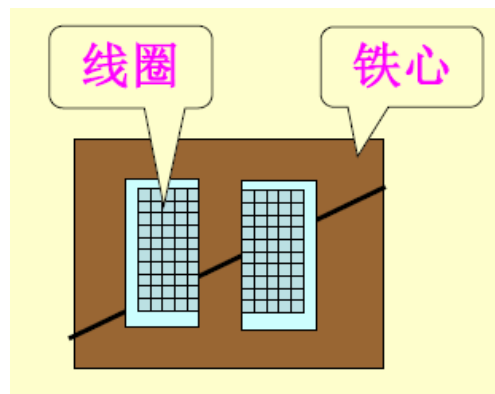
○ 按绕组分：

- n** 双绕组变压器——将电源电压变换成一种电压等级
- n** 三绕组变压器——将电源电压变换成两种电压等级
- n** 多绕组变压器——将电源电压变换成多种电压等级

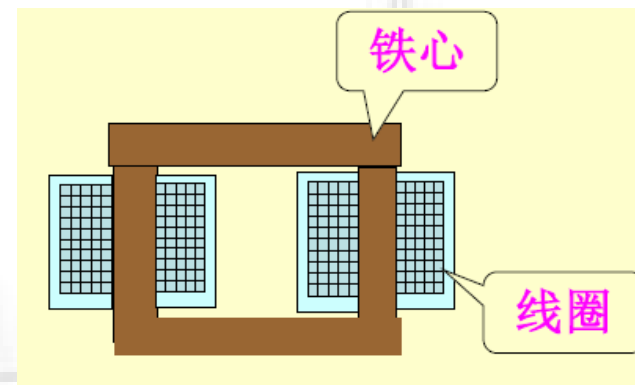


○ 按铁心结构分：

- n** 心式变压器
- n** 壳式变压器



壳式变压器



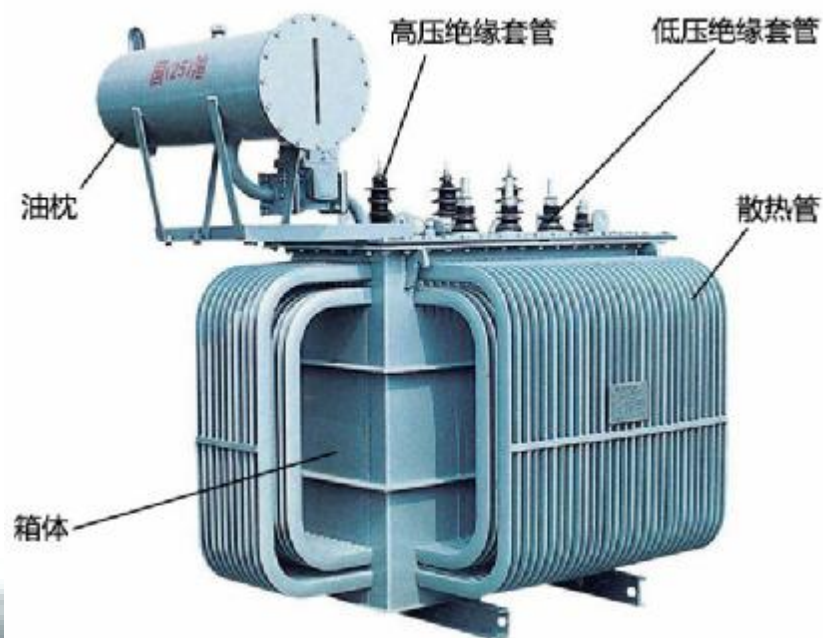
心式变压器

1 变压器的分类

○ 按冷却条件分：

n 油浸式变压器——变压器的铁心和绕组浸在变压器油中

n 空冷式变压器——变压器的铁心和绕组通过空气进行冷却



1 变压器概述

○ 变压器的用途

- n 电力变压器主要用于电力系统升高或降低电压
- n 仪用变压器一般指电流互感器和电压互感器，可以将大电流变为小电流，高电压变为低电压后通过一般测量仪表进行测量。
- n 调压变压器可用来调节电压，实验室常用。
- n 电焊变压器具有陡降的输出特性，用于电弧焊接。
- n 在电子电路中，变压器常用来变换阻抗。
- n 在自动控制系统中，变压器还可用来传输信号，在电源子系统广泛使用。
- n 隔离变压器用于抑止电控系统的传导干扰。

○ 变压器的铭牌

2 变压器的铭牌数据

○ 变压器的铭牌

n 产品型号

产品型号 S11-M-315/10

S — 在第一位代表三相，在第三、第四位则代表三绕组

F — 代表油浸风冷

Z — 代表有载调压

J — 代表油浸自冷

L — 代表铝绕组或防雷

P — 代表强油循环风冷

D — 代表单相，在末位表示移动式

O — 代表自耦，在第一位代表降压，在末位表示升压

X — 代表消弧线圈

2 变压器的铭牌数据

○ 变压器的铭牌数据

n 额定容量 S_N 额定容量 315 kva

是变压器的视在功率，单位**VA**、**kVA**或**MVA**。它是使变压器在稳定负载和额定使用条件下，施加额定电压，且频率为额定频率时能输出额定电流而不超过温升限值的容量。通常把变压器一次侧和二次侧的额定容量设计得相等。

n 额定电压 U_{1N}/U_{2N} 额定电压 10000±5%/400

变压器各绕组在空载额定分接下端子间电压的保证值，对于三相变压器，其额定电压是指线电压，单位**V**或**kV**。

2 变压器的铭牌数据

○ 变压器的铭牌数据

n 额定电流 I_{1N}/I_{2N}

变压器的额定容量除以各绕组的额定电压所计算出来的线电流值(三相时,还应除以系数 $\sqrt{3}$),单位**A**。

单相变压器的一次、二次绕组的额定电流为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}}$$

三相变压器的一次、二次绕组的额定电流为

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

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}$$

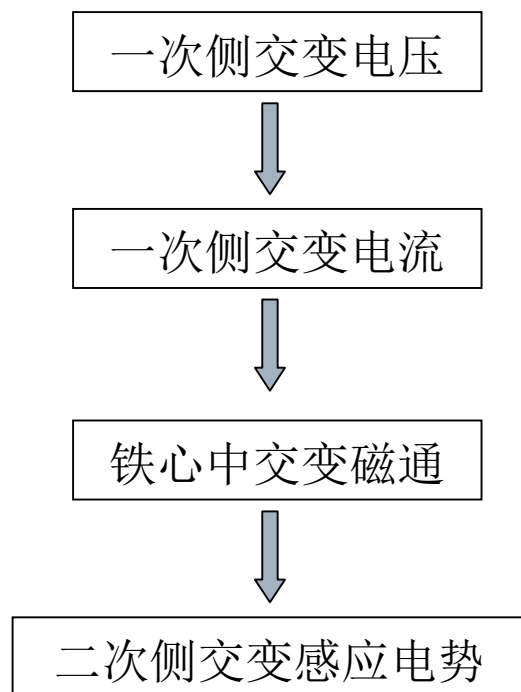
n 额定频率 f_N

额定频率 50HZ

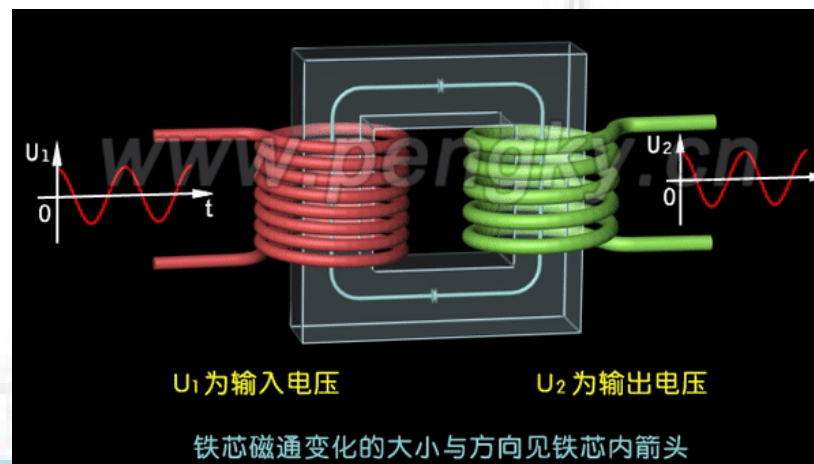
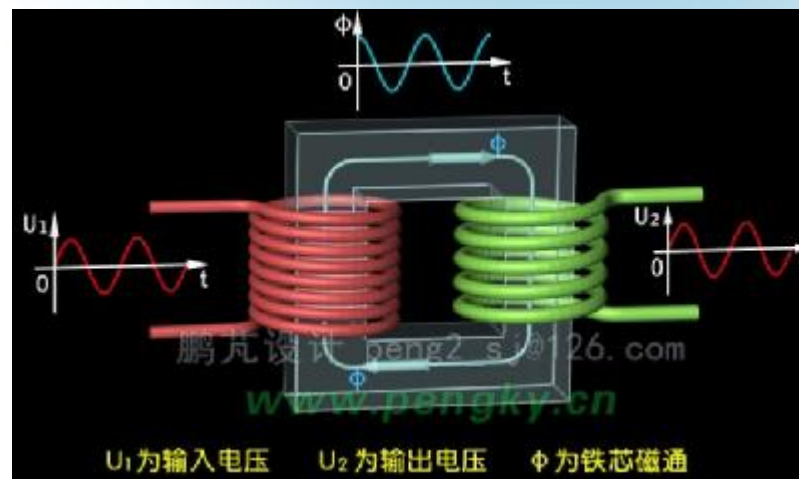
原边所接交流电源的频率,单位**Hz**。我国电网频率规定为**50Hz**。

3.1 变压器原理

○ 变压器工作原理



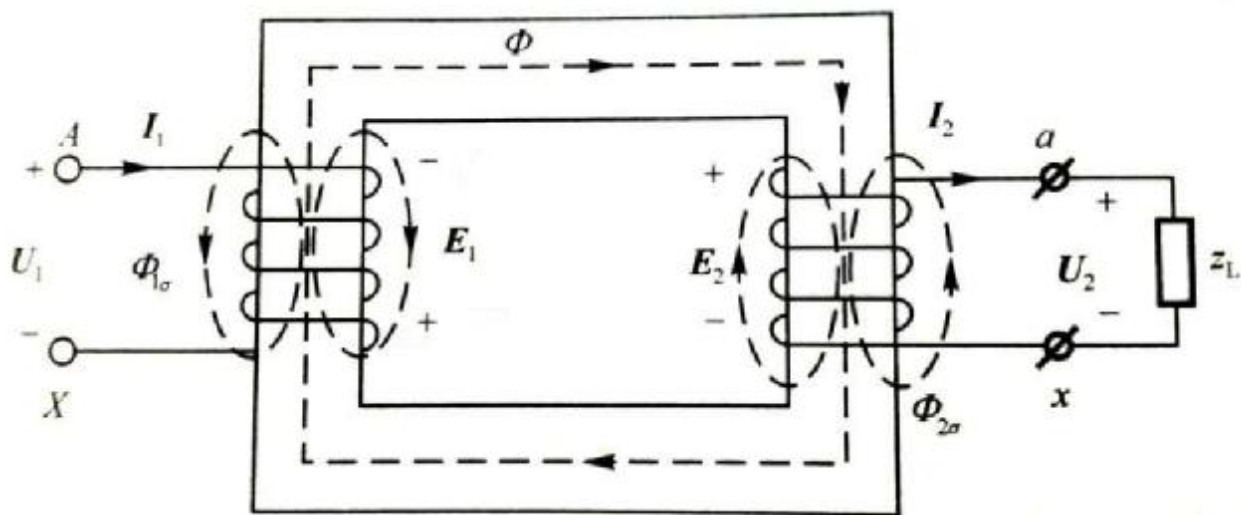
电路只有磁耦合，没有电联系
一次侧输入直流电压可否？



3.1 变压器原理

○ 变压器的参考方向规定

下角标 1 表示原边(一次侧)，下角标 2 表示副边(二次侧)。

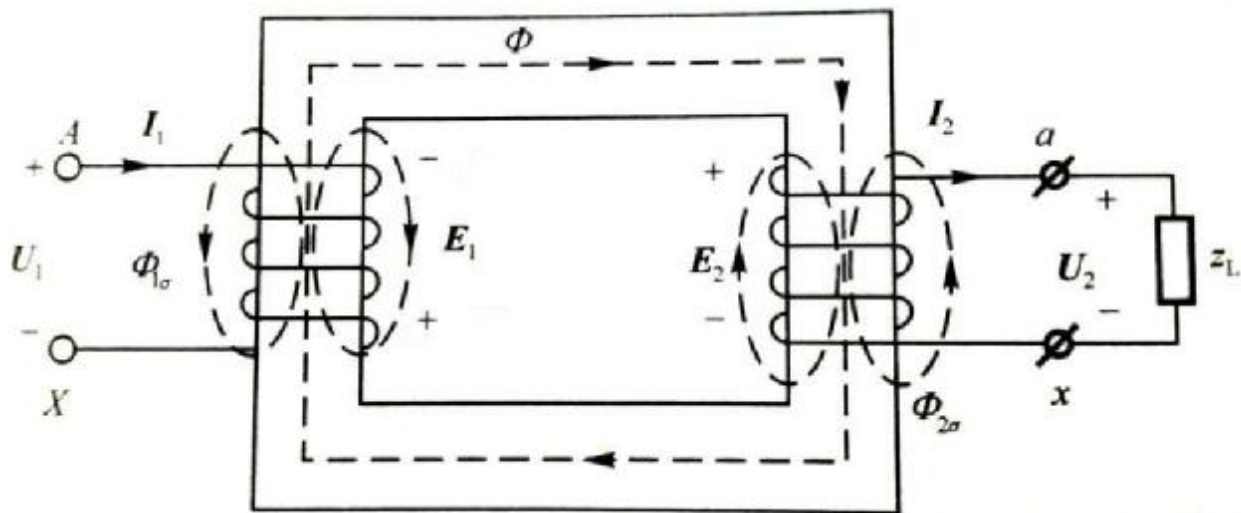


n 第一步：任意规定原绕组电压 U_1 方向；

n 第二步：确定 I_1 的方向，假设原边绕组是纯电阻，则正 U_1 产生电流的方向为 I_1 的正方向；

3.1 变压器原理

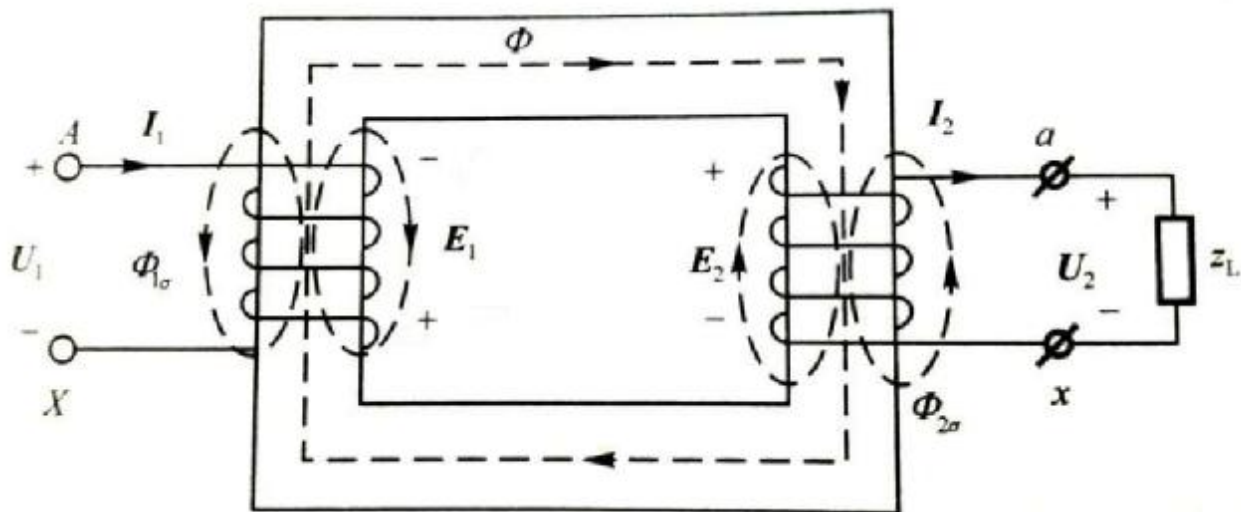
○ 变压器的参考方向规定



- n 第三步：确定磁通 Φ 的方向，根据电流 I_1 和右手定则确定磁通 Φ 的方向，此时应注意绕组的绕法；
- n 第四步：确定感应电势 E_1 的方向， E_1 的正方向与 I_1 的正方向一致；

3.1 变压器原理

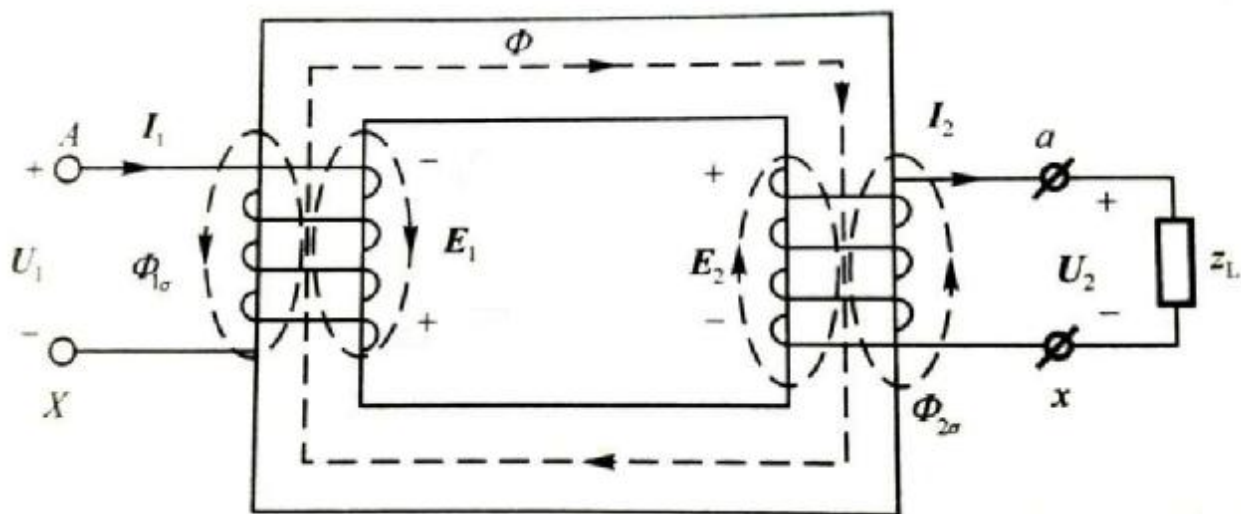
○ 变压器的参考方向规定



- n 第五步：确定感应电势 E_2 的方向， E_2 的正方向和磁通 Φ 的正方向符合右手定则；
- n 第六步：确定副边电流 I_2 的方向， I_2 的正方向与 E_2 的正方向一致。

3.1 变压器原理

○ 变压器的参考方向规定



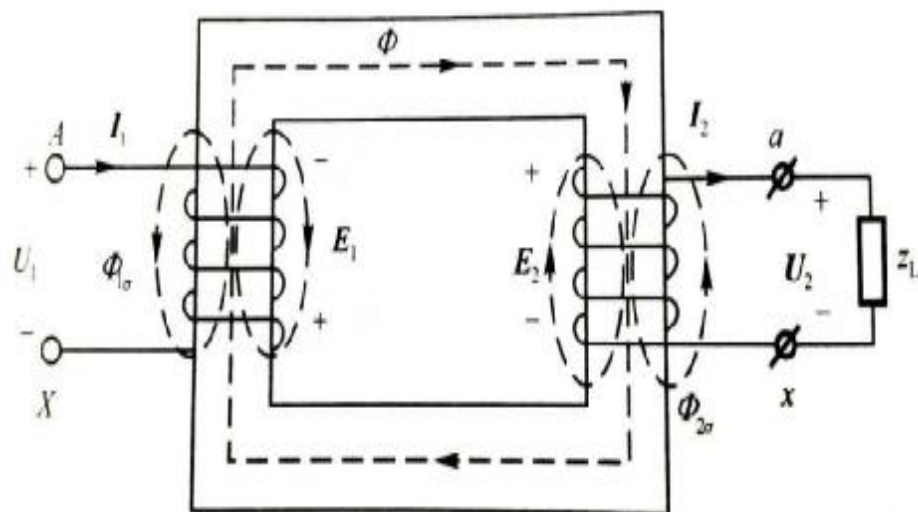
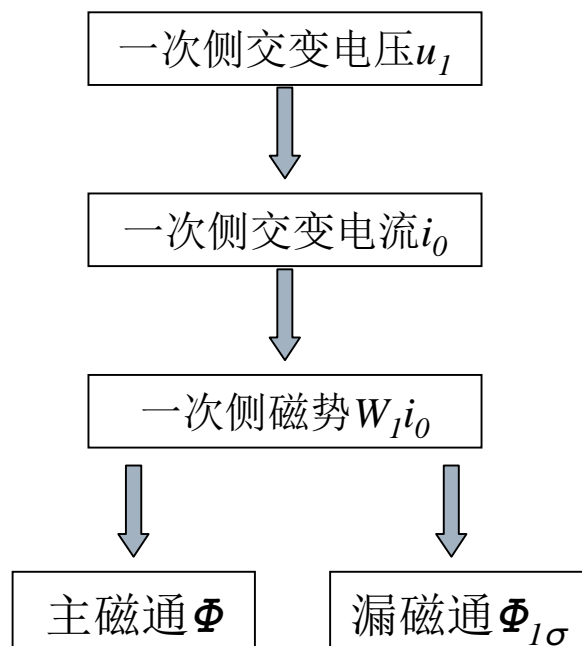
- n 第七步：确定负载电势 U_2 的方向，规定 I_2 在纯阻负载上所产生的电压降的方向就是 U_2 的正方向。

所有变量都是交变的交流量，规定的方向只是为了分析问题

3.2 变压器的空载运行

○ 磁通和感应电势

n Z_L 断开即为空载



空载时铁心中的主磁通是由一次绕组产生的

3.2 变压器的空载运行

○ 磁通和感应电势

n 主磁通产生的感应电势

$$e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} = -W_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

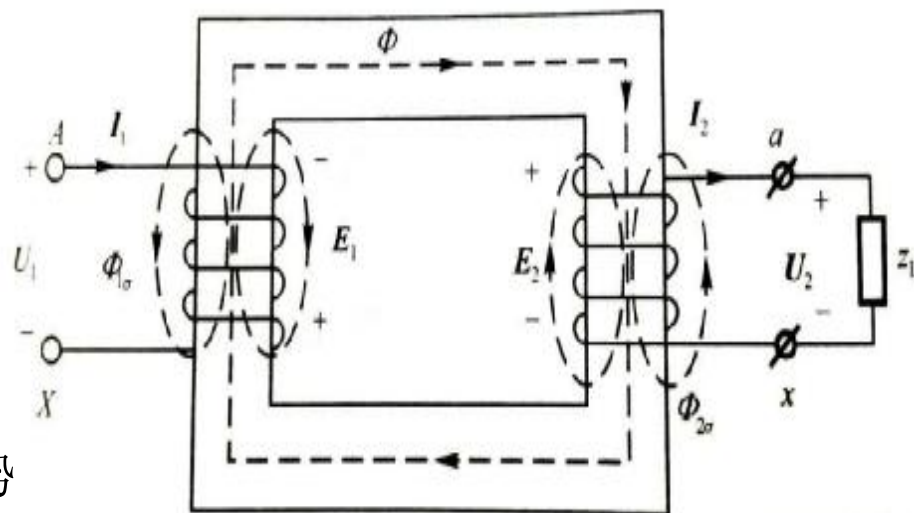
$$e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

n 原边漏磁通产生的感应电势

$$e_{1s} = -\frac{d\Psi_{1s}}{dt} = -W_1 \frac{d\Phi_{1s}}{dt}$$

n 感应电势的关系

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = k$$



e_1 与 e_2 的相位是一样的，所以其瞬时值之比等于有效值 E_1 与 E_2 之比。 k 为匝数比，又称为**变比**。

3.2 变压器的空载运行

○ 电压平衡方程式

n 一次侧电压平衡方程

瞬时值: $u_1 = -(e_1 + e_{1s}) + r_1 i_1$

矢量形式: $\dot{U}_1 = -(\dot{E}_1 + \dot{E}_{1s}) + r_1 \dot{I}_1$

n 二次侧电压平衡方程

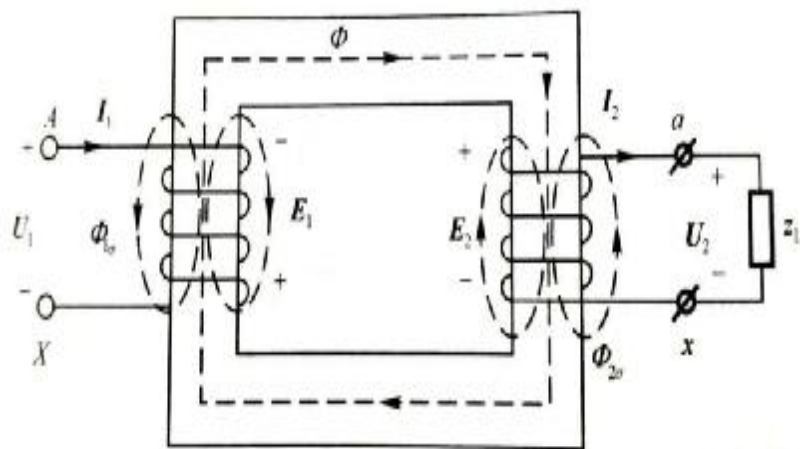
瞬时值: $u_2 = e_2$

矢量形式: $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$

n 输入输出近似关系

矢量形式: $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$

有效值: $U_1 \approx E_1$



空载时原、副边
电压比近似为
原、副边匝数比

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = k$$

3.2 变压器的空载运行

○ 感应电势、电源电压、主磁通、激磁电流

n 感应电势与主磁通的关系(4.44公式)

因为 u_1 是按正弦规律变化, 而 $u_1 \approx -e_1$, 所以 e_1 也按照正弦规律变化。
而 $e_1 = -W_1 d\Phi/dt$, 可知磁通 Φ 按余弦规律变化, 不妨设。

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t$$

一次侧感应电势瞬时值:

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt} = W_1 \omega \Phi_m \sin \omega t$$

一次侧感应电势最大值:

$$E_{1m} = W_1 \omega \Phi_m$$

一次侧感应电势有效值值:

$$E_1 = \frac{W}{\sqrt{2}} W_1 \Phi_m = \sqrt{2} p f W_1 \Phi_m = 4.44 f W_1 \Phi_m$$

二次侧感应电势有效值值:

$$E_2 = \frac{W}{\sqrt{2}} W_2 \Phi_m = \sqrt{2} p f W_2 \Phi_m = 4.44 f W_2 \Phi_m$$

3.2 变压器的空载运行

○ 感应电势、电源电压、主磁通、激磁电流

n 感应电势与主磁通的关系(4.44公式)

感应电势有效值:

$$E_1 = 4.44 f W_1 \Phi_m$$

$$E_2 = 4.44 f W_2 \Phi_m$$

f 为激磁电源频率, W_1 和 W_2 为原、副边绕组匝数, Φ_m 为铁心中主磁通最大值。

n 电源电压与主磁通的关系

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f W_1 \Phi_m$$

*在电源频率一定时, 铁心中主磁通的幅值主要由电源电压决定。

*电源电压一定, 主磁通一定; 电源电压增大, 主磁通增大

3.2 变压器的空载运行

○ 感应电势、电源电压、主磁通、激磁电流

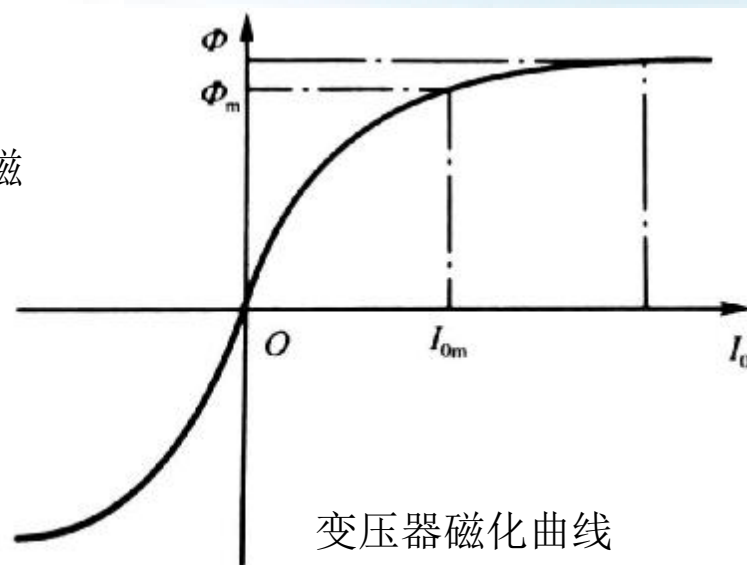
$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f W_1 \Phi_m$$

n 激磁电流与主磁通的关系

(1) 变压器空载时原边电流 I_0 就是产生主磁通的电流，又称为激磁电流。

(2) 激磁电流与主磁通的关系由变压器磁化曲线表示。

(3) 变压器在额定状态工作时，磁路接近饱和。不大的磁通增量将引起激磁电流成倍的增长。



变压器原边电压不能高于额定电压！！！！

3.2 变压器的空载运行

○ 感应电势、电源电压、主磁通、激磁电流

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f W_1 \Phi_m$$

n 激磁电流与主磁通的关系

设变压器的磁路磁阻为 R_m ，原边磁势为 F_1

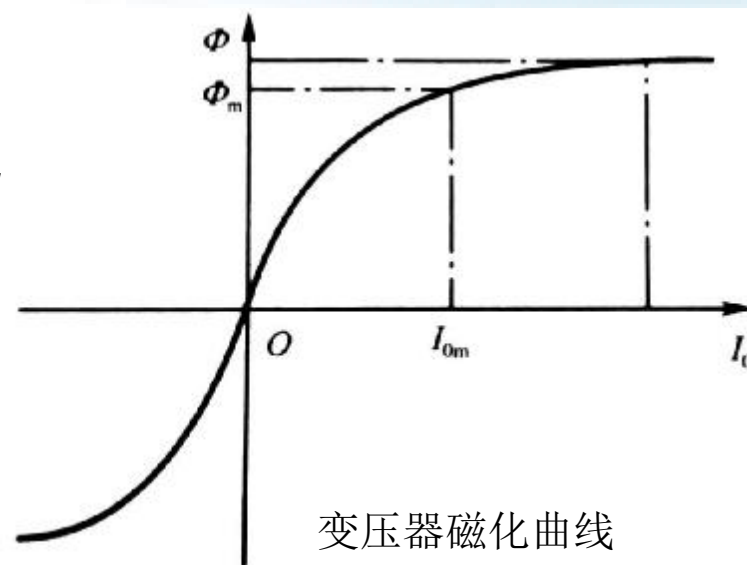
$$F_1 = W_1 I_0$$



$$\Phi_m = \frac{\sqrt{2} F_1}{R_m} = \frac{\sqrt{2} W_1 I_0}{R_m}$$



$$U_1 \approx E_1 = \sqrt{2} p f W_1 \Phi_m = \frac{2 p f W_1^2 I_0}{R_m}$$



变压器磁化曲线

当激磁电压不变时，若增加变压器磁路磁阻，则激磁电流将增加

3.3 变压器的负载运行

○ 磁势平衡方程

可以用**相量**表示正弦量。表示正弦量的复数，其幅角等于初相，其模等于振幅。

n 空载时铁心中的磁势为

$$\dot{F}_0 = W_1 \dot{I}_0$$

n 负载时铁心中的磁势为

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = W_1 \dot{I}_1 + W_2 \dot{I}_2$$

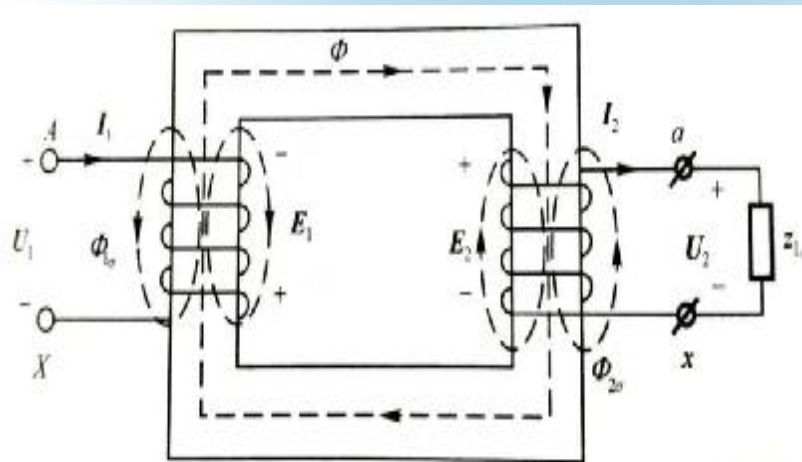
n 空载与负载磁势相等(为什么???)

$$W_1 \dot{I}_1 + W_2 \dot{I}_2 = W_1 \dot{I}_0$$



$$\frac{r}{I_1} + \frac{W_2}{W_1} \frac{r}{I_2} = \frac{r}{I_0}$$

$$\frac{r}{I_1} + \frac{1}{k} \frac{r}{I_2} = \frac{r}{I_0}$$



磁势平衡方程或电流平衡方程

3.3 变压器的负载运行

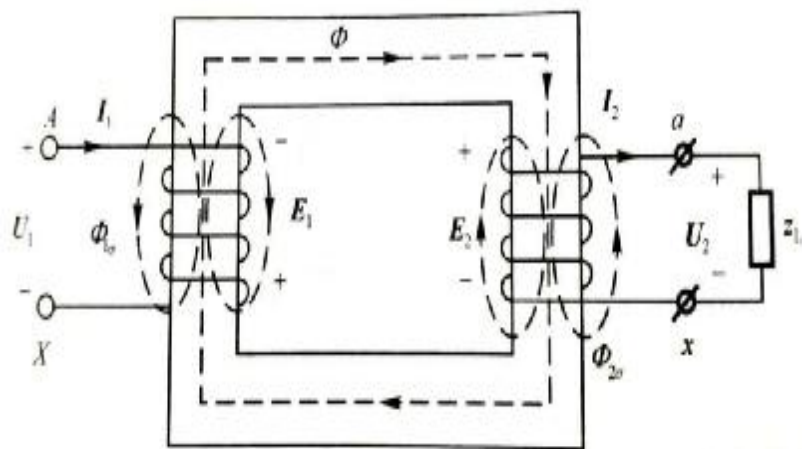
○ 磁势平衡方程

$$\frac{r}{I_1} + \frac{1}{k} \frac{r}{I_2} = I_0$$

$$\dot{I}_L = -\dot{I}_2 / k$$

$$W_1 \dot{I}_L = -W_2 \dot{I}_2$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_L$$



- n 负载时，原边电流可认为有两个分量组成
- n 一个分量 \dot{I}_0 用来在变压器铁心中产生主磁通 Φ ，称为激磁分量
- n 一个分量 \dot{I}_L 用来抵消负载边电流所产生的磁势，称为负载分量。这一分量在负载时才有。
- n 负载分量的磁势与副边磁势大小相等，方向相反。

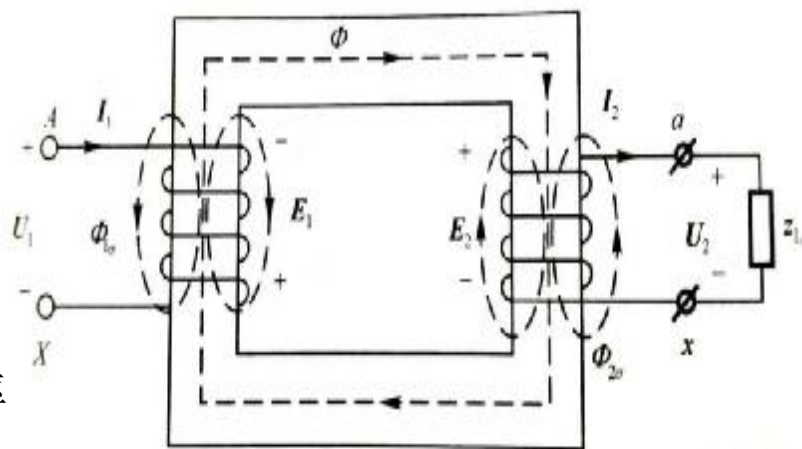
3.3 变压器的负载运行

○ 磁势平衡方程

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_L$$

$$\dot{I}_L = -\dot{I}_2 / k$$

- n 电流的负载分量 \dot{I}_L 和负载电流分量 \dot{I}_2 成比例，所以随着负载电流的增加，原边电流也相应增加，电功率从原边传递到副边。



- n 变压器的功率传递和变压器作用都是基于原、副绕组之间的互感作用。没有导线连接，也可以传递大量的电功率。
- n 一般激磁电流分量 \dot{I}_0 只占原边电流 \dot{I}_1 额定值的10%以下，在粗略分析时，可忽略激磁电流分量，有

$$W_1 \dot{I}_1 = -W_2 \dot{I}_2$$

$$\frac{\mathbf{r}}{I_1} = -\frac{1}{k} \frac{\mathbf{r}}{I_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{k} = \frac{W_2}{W_1}$$

3.3 变压器的负载运行

○ 电压平衡方程

n 原、副边电压平衡方程

$$\dot{U}_1 = -(\dot{E}_1 + \dot{E}_{1s}) + r_1 \dot{I}_1$$

$$\dot{E}_2 = -\dot{E}_{2s} + r_2 \dot{I}_2 + Z_L \dot{I}_2$$

n 原、副边的漏磁链为

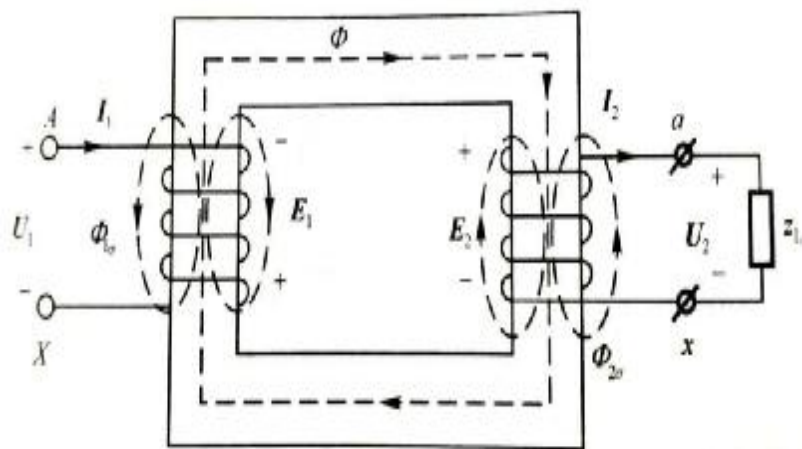
$$\Psi_{1s} = L_{1s} i_1$$

$$\Psi_{2s} = L_{2s} i_2$$

$L_{1\sigma}$ 和 $L_{2\sigma}$ 是原副边绕组的漏电感，由于漏磁回路的磁阻近似常值，所以比例系数 $L_{1\sigma}$ 和 $L_{2\sigma}$ 为常值，则有

$$e_{1s} = -\frac{d\Psi_{1s}}{dt} = -L_{1s} \frac{di_1}{dt}$$

$$e_{2s} = -\frac{d\Psi_{2s}}{dt} = -L_{2s} \frac{di_2}{dt}$$



3.3 变压器的负载运行

○ 电压平衡方程

n 原、副边的漏磁链为

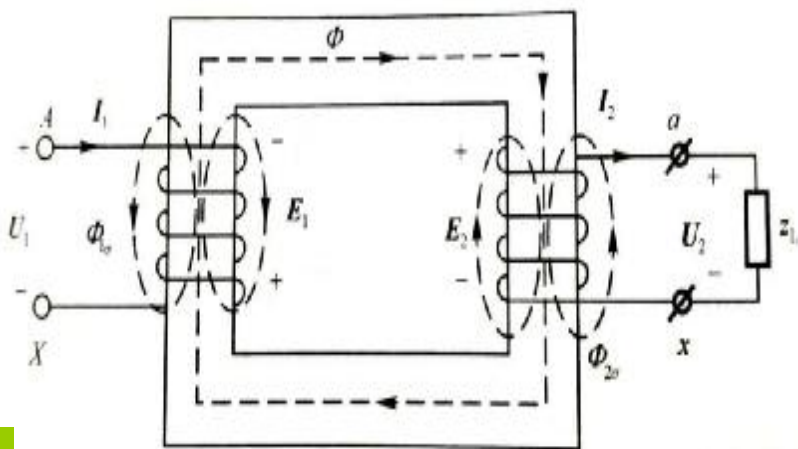
$$e_{1s} = -\frac{d\Psi_{1s}}{dt} = -L_{1s} \frac{di_1}{dt}$$

$$e_{2s} = -\frac{d\Psi_{2s}}{dt} = -L_{2s} \frac{di_2}{dt}$$

相量形式

$$\dot{E}_{1s} = -j\omega L_{1s} \dot{I}_1 = -jx_{1s} \dot{I}_1$$

$$\dot{E}_{2s} = -j\omega L_{2s} \dot{I}_2 = -jx_{2s} \dot{I}_2$$



x_{1s} 、 x_{2s} 称为原、副边的漏电抗或简称漏抗。对于已制成的变压器， x_{1s} 和 x_{2s} 都为常数，与铁心的饱和无关。

n 原、副边电压平衡方程

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + (r_1 + jx_{1s}) \dot{I}_1$$

$$\dot{E}_2 = (r_2 + jx_{2s}) \dot{I}_2 + \dot{U}_2$$

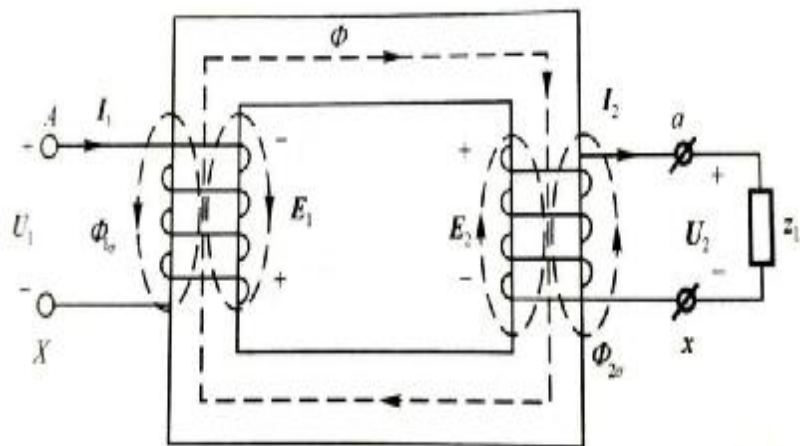
3.3 变压器的负载运行

○ 负载时的电源电压、感应电势、主磁通与激磁电流

n 感应电势与主磁通的关系

$$E_1 = 4.44 f W_1 \Phi_m$$

$$E_2 = 4.44 f W_2 \Phi_m$$



n 电源电压与主磁通的关系

在实际变压器中 $E_{1\sigma}$ 、 $r_1 I_1$ 与 E_1 比较起来数值都很小，因此在负载时仍有

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f W_1 \Phi_m$$

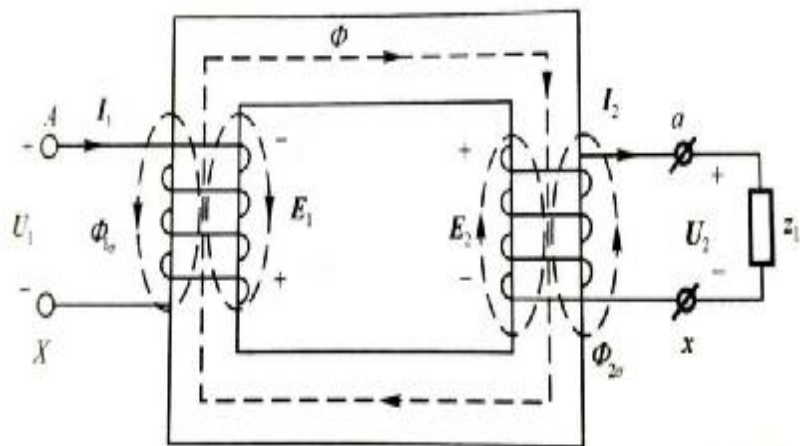
也就是当电源电压不变时，负载时的主磁通、感应电势、激磁电流与空载时的对应值近似相等。

3.3 变压器的负载运行

○ 负载时的电源电压、感应电势、主磁通与激磁电流

- n 为了分析问题方便，把 E_1 和 I_0 之间的关系用参数形式反映，即把 E_1 写成 I_0 流过一个阻抗引起的压降

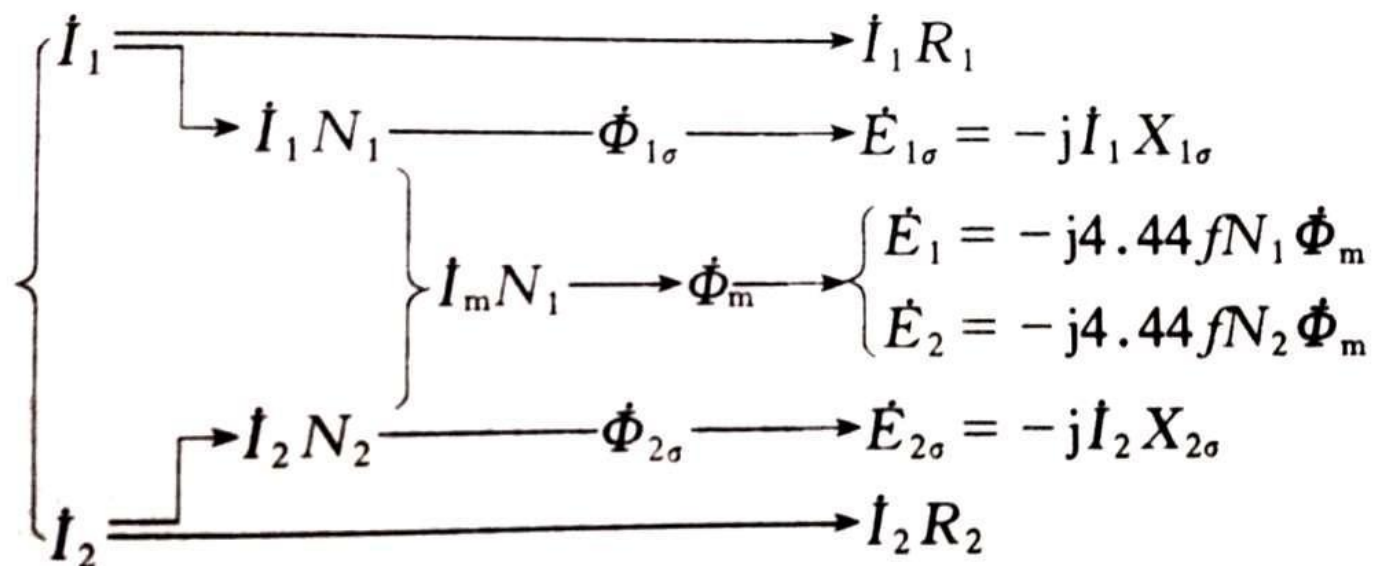
$$\dot{E}_1 = -Z_m \dot{I}_0 = -(r_m + jx_m) \dot{I}_0$$



其中 $Z_m = r_m + jx_m$ 称为激磁阻抗， r_m 称为激磁电阻，它不代表激磁绕组中的实有电阻，只是一个假设电阻。 I_0 流经 r_m 时所产生的损耗 $I_0^2 r_m$ 代表交变磁通产生的铁耗(涡流损耗和磁滞损耗)。 x_m 称为激磁电抗，它代表原边线圈除掉漏磁通后的感抗。

3.3 变压器的负载运行

○ 负载时的物理过程



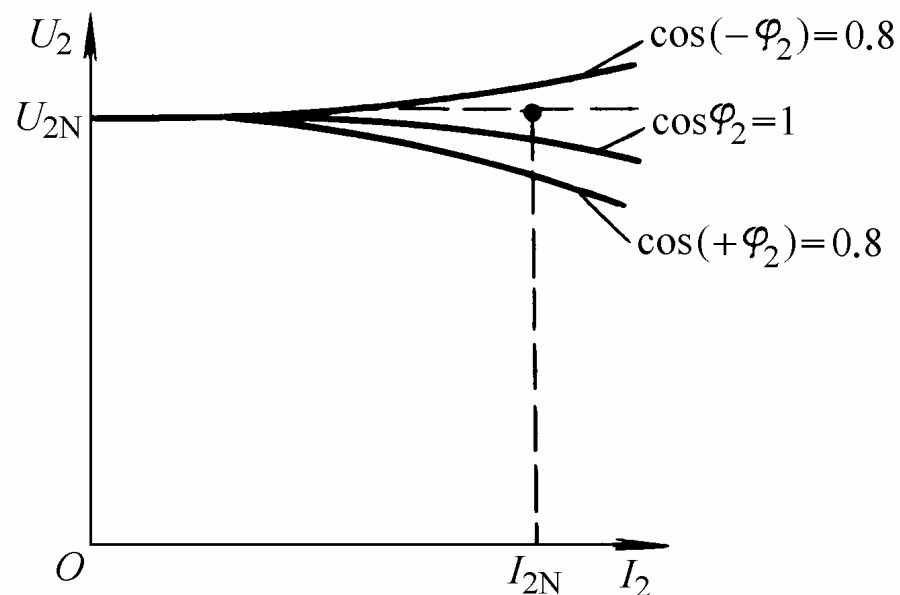
3.3 变压器的负载运行

○ 负载时变压器二次侧端电压变化

n 由于绕组有电阻和漏抗，负载时，负载电流通过这些漏阻抗必然产生内部压降，即使一次绕组电压保持稳定，二次侧端电压也会随着负载变化而变化

n 二次侧端电压随着负载变化规律与负载的功率因数有关

n 变压器外特性是一次侧外施电压等于额定电压，负载功率因数不变时，二次侧端电压随二次侧负载电流变化的关系曲线。



变压器外特性

3.3 变压器的负载运行

○ 变压器的效率

n 变压器在能量传递过程中，将产生铜耗和铁耗，它们又各自包含有基本损耗和附加损耗。

n 铜耗

○ 基本铜耗：原、副边绕组总电流引起的直流电阻的损耗

○ 附加铜耗：导体在交变漏磁场作用下引起的集肤效应，有效电阻增大而增加的铜耗

n 铁耗

○ 基本铁耗：铁心中的磁滞、涡流损耗

○ 附加铁耗：结构件中的涡流损耗

3.3 变压器的负载运行

○ 变压器的效率

n 变压器效率是指变压器的输出功率与输入功率的比值

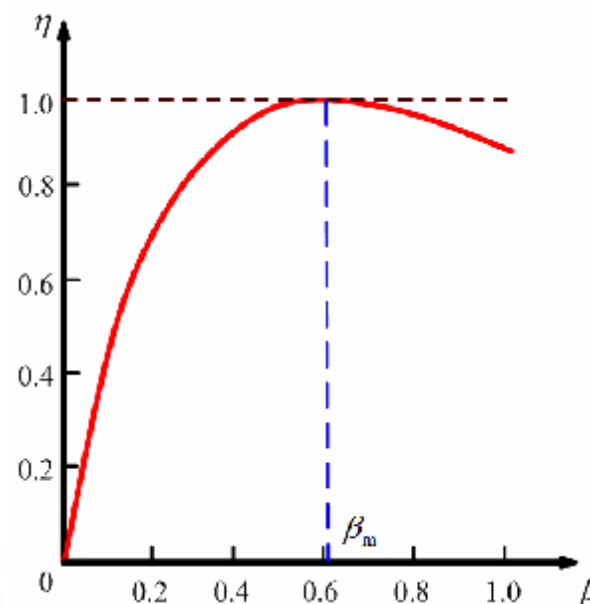
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

n 效率大小是表征变压器运行性能的重要指标之一。一般来说变压器效率较高，大多数在95%以上，而大型变压器的效率可达99%以上。

n 变压器效率特性曲线是变压器效率与负载系数 β 的关系曲线

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1N}}$$

n 一般由于变压器都不是长期在额定负载下运行，因此 β_{max} 值约选在0.5~0.7之间。



效率特性

3.3 变压器的负载运行

○ 变压器负载的基本方程

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + Z_1 \dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + (r_1 + jx_{1s}) \dot{I}_1$$

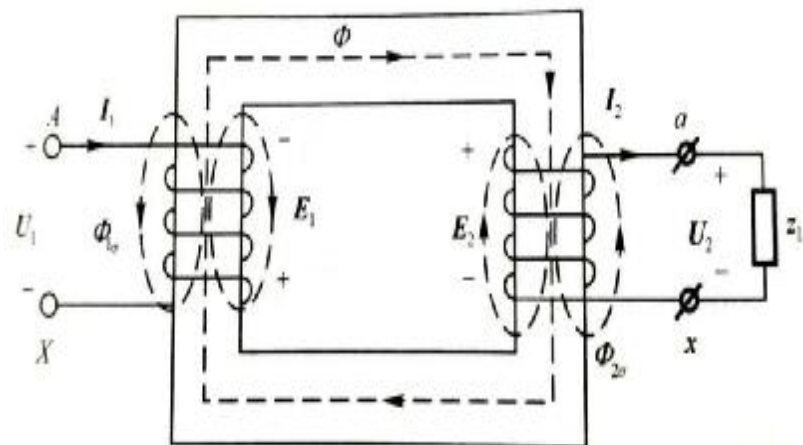
$$\dot{E}_1 = -Z_m \dot{I}_0 = -(r_m + jx_m) \dot{I}_0$$

$$\dot{E}_2 = Z_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2 = (r_2 + jx_{2s}) \dot{I}_2 + \dot{U}_2$$

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

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

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = k$$



4 变压器等效电路

变压器原副边匝数不同，且绕组电气上不相连，只通过电磁感应而联系，这使得分析问题是较复杂。因此希望有一个既能正确反映变压器内部电磁过程，又便于工程计算的单纯电路来替代实际变压器，这种电路称为变压器的**等效电路**。

○ 变压器绕组折算(绕组归算)

绕组折算就是把二次侧绕组的匝数变换成一次绕组的匝数(二次侧折算到一次侧)，或者把一次侧绕组的匝数变换成二次绕组的匝数(一次侧折算到二次侧)，而不改变其电磁效应的一种分析方法。通常二次侧折算到一次侧较多。即假设一个新的二次绕组，其匝数等于一次绕组匝数，且原有的电磁关系不变。

○ 变压器绕组折算原则

n 磁势保持不变

n 能量保持不变

4.1 变压器绕组折算

○ 电动势和电压的折算

n 二次绕组折算后其匝数为

$$W_2' = W_1$$

n 感应电势大小与绕组的匝数成正比，则

$$\frac{E_2'}{E_2} = \frac{W_2'}{W_2} = \frac{W_1}{W_2} = k \quad \longrightarrow \quad E_2' = kE_2$$

n 上式说明要把副边电势折合到原边，只需乘以变比 k

n 同理，副边其他电势和电压也按同一比例折算，得

$$E_{2s}' = kE_{2s}$$

$$U_2' = kU_2$$

4.1 变压器绕组折算

○ 电流的折算

- n 保证二次侧磁动势在折算前后不变

$$W_2' I_2' = W_2 I_2 \quad \longrightarrow \quad I_2' = \frac{W_2}{W_2'} I_2 = \frac{W_2}{W_1} I_2 = \frac{1}{k} I_2$$

- n 上式说明要把副边电流折合到原边，只需除以变比 k

○ 阻抗的折算

- n 保证折算前后电阻铜耗及漏感中的无功功率不变

$$I_2'^2 R_2' = I_2^2 R_2 \quad \longrightarrow \quad R_2' = \frac{I_2^2}{I_2'^2} R_2 = k^2 R_2$$

$$I_2'^2 X_2' = I_2^2 X_2 \quad \longrightarrow \quad X_2' = \frac{I_2^2}{I_2'^2} X_2 = k^2 X_2$$

$$I_2'^2 R_L' = I_2^2 R_L \quad \longrightarrow \quad R_L' = \frac{I_2^2}{I_2'^2} R_L = k^2 R_L$$

- n 上式说明要把副边阻抗折合到原边，只需乘以变比 k^2

4.1 变压器绕组折算

○ 折算前的基本方程

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

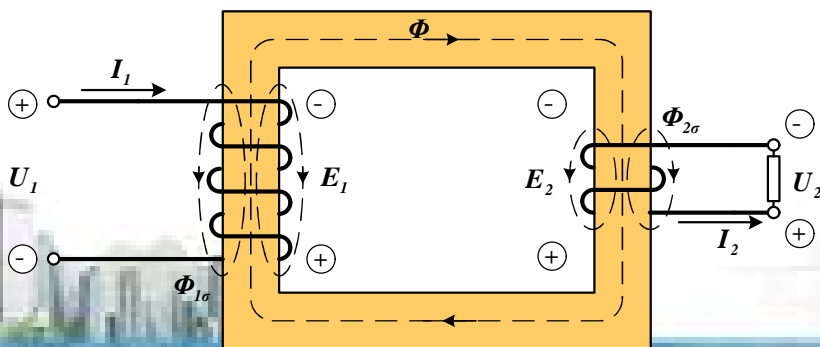
$$\dot{E}_2 = Z_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2 = (r_2 + jx_{2s}) \dot{I}_2 + \dot{U}_2$$

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

$$\dot{I}_1 + \frac{1}{k} \dot{I}_2 = \dot{I}_0$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + Z_1 \dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + (r_1 + jx_{1s}) \dot{I}_1$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = k$$



○ 折算后的基本方程

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

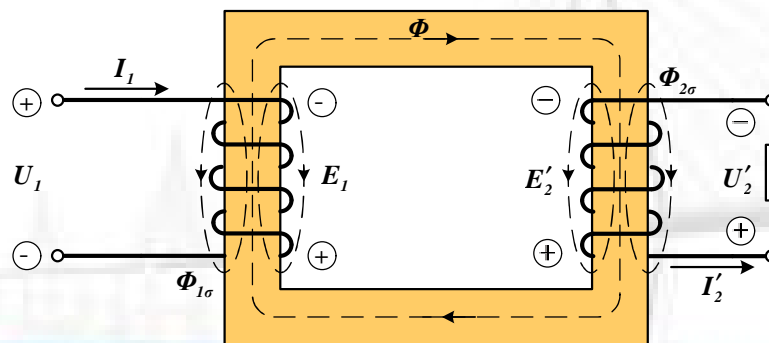
$$\dot{E}'_2 = Z'_2 \dot{I}'_2 + \dot{U}'_2 = (r'_2 + jx'_{2s}) \dot{I}'_2 + \dot{U}'_2$$

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

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

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + Z_1 \dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + (r_1 + jx_{1s}) \dot{I}_1$$

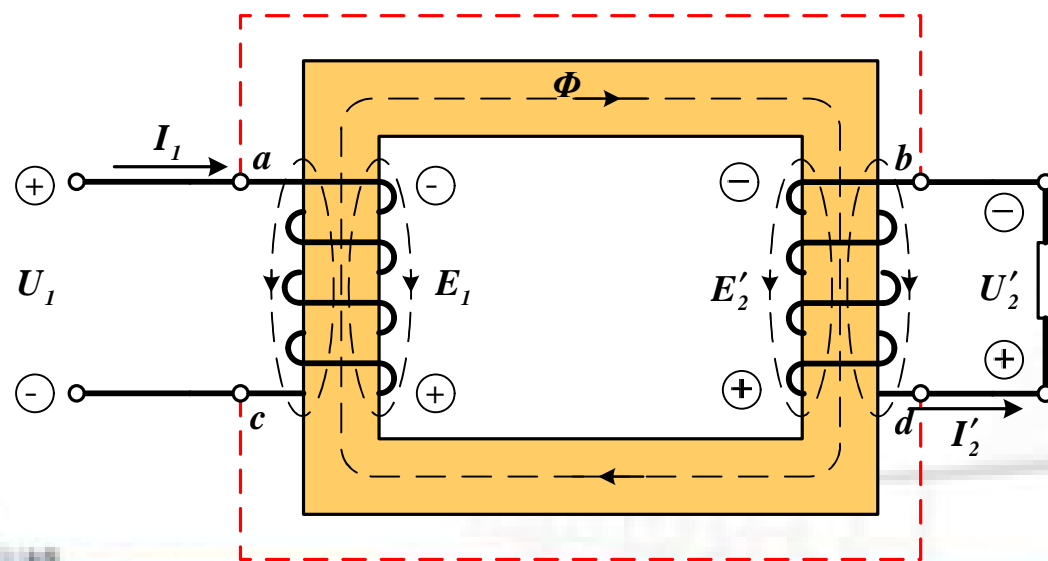
$$E_1 = E'_2$$



4.2 变压器等效电路

○ 变压器的等效电路

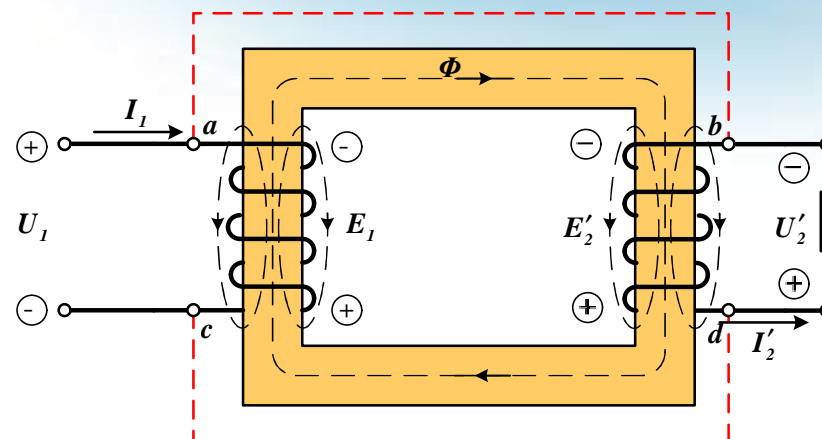
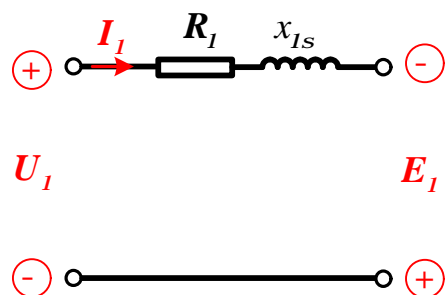
- n 如下折算绕组后的变压器示意图，二次绕组已经折算到一次绕组，即 $W_1=W_2'$ ，这时电压比为1的变压器。因此 $E_1=E_2'$ ；因此图中a、b和c、d是等电位点，用导线把他们连接起来，不会破坏原、副边电路的独立性，在连线中并无电流。因此可以将两个并联绕组合并成一个绕组，在这个绕组中有电流 I_0 通过。



4.2 变压器等效电路

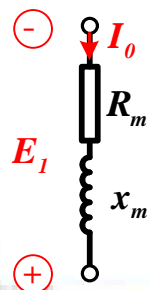
n 一次绕组等效电路

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + Z_1 \dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + (r_1 + jx_{1s}) \dot{I}_1$$



n 激磁电路等效电路

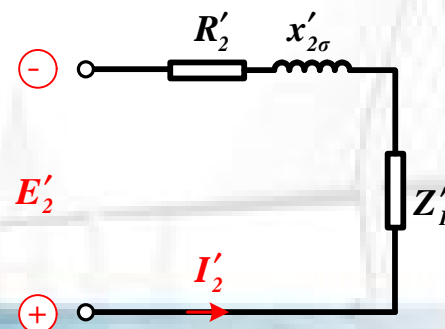
$$\dot{E}_1 = -Z_m \dot{I}_0 = -(r_m + jx_m) \dot{I}_0$$



n 二次绕组等效电路

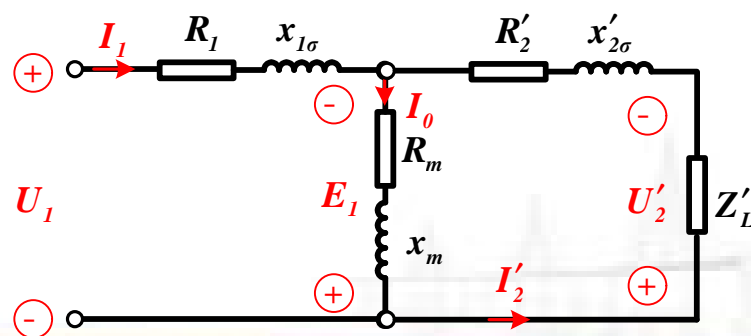
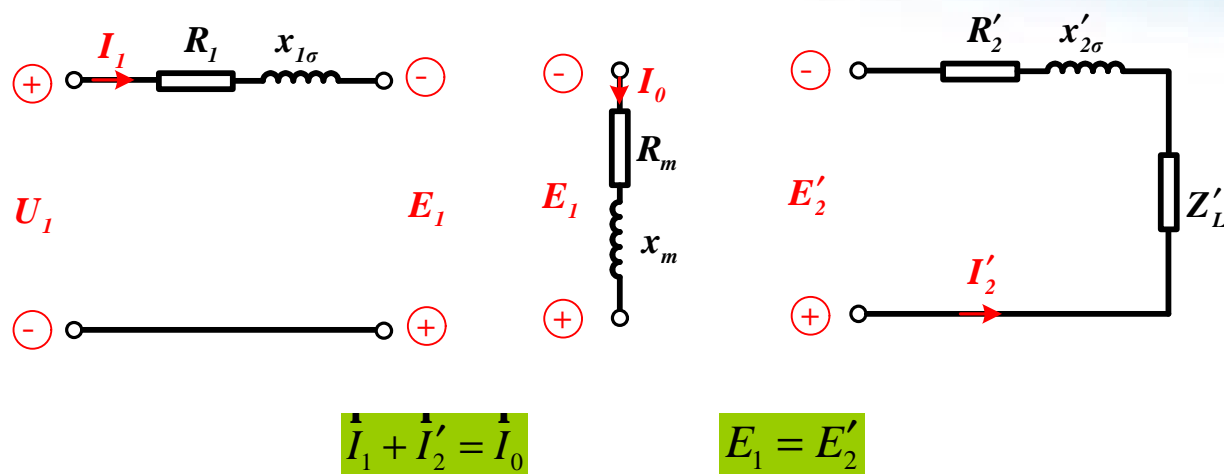
$$\dot{E}_2 = Z_2' \dot{I}_2' + \dot{U}_2' = (r_2' + jx_{2s}') \dot{I}_2' + \dot{U}_2'$$

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



4.2 变压器等效电路

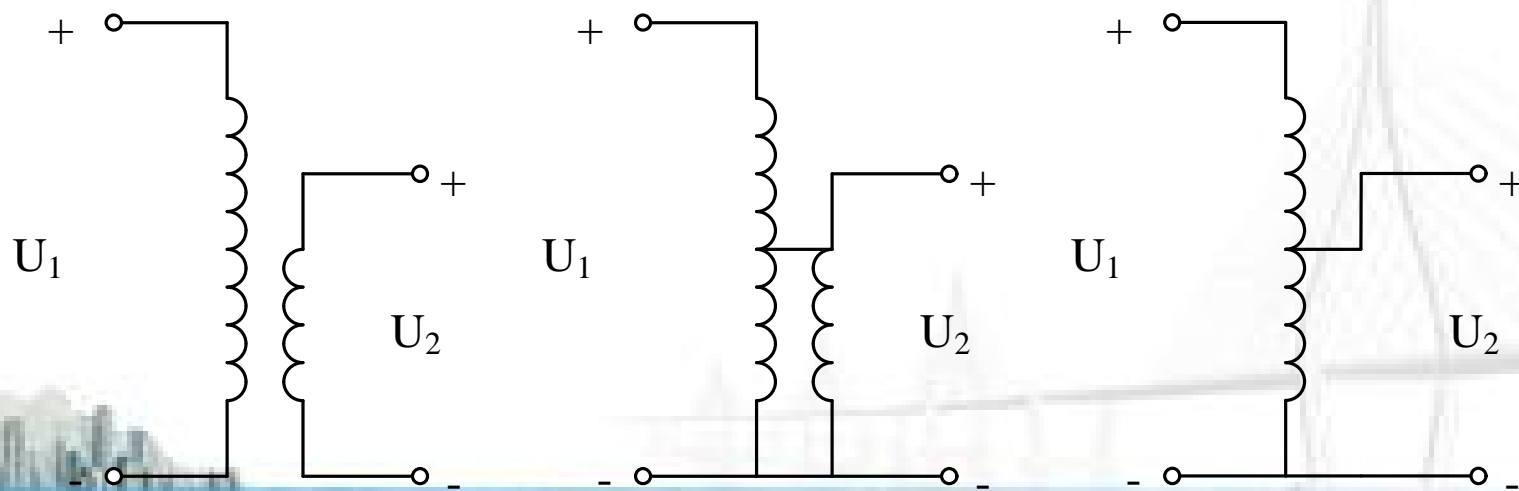
○ 变压器的等效电路



5 特殊变压器

○ 自偶变压器

- n** 自耦变压器仅有一个绕组，其一次、二次绕组之间既有磁的耦合，又有电的联系
- n** 自耦变压器的特点是一次、二次绕组共用一个绕组，此时一次绕组中的一部分充当二次绕组（自耦降压变压器）或二次绕组中的一部分充当一次绕组（自耦升压变压器）



5.1 自偶变压器

○ 工作原理

n 变压器运行时，由4.44公式可得

$$E_1 = 4.44 f W_1 \Phi_m$$

$$E_2 = 4.44 f W_2 \Phi_m$$

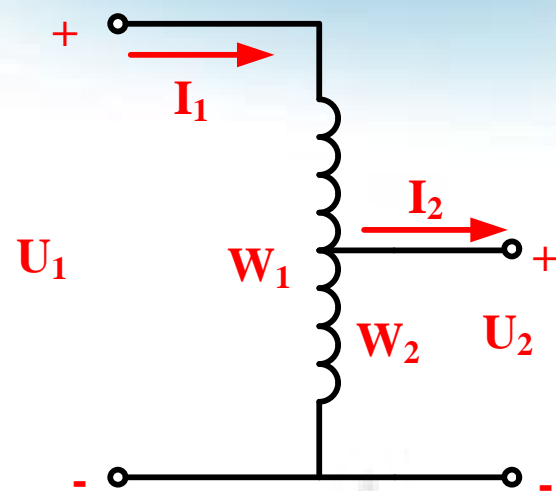
若忽略漏阻抗压降

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f W_1 \Phi_m$$

$$U_2 \approx E_2 = 4.44 f W_2 \Phi_m$$

n 变压器变比为：

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = k$$



5.1 自偶变压器

○ 磁势平衡

n 空载与负载磁势相等

$$\dot{I}_1(W_1 - W_2) + (\dot{I}_1 - \dot{I}_2)W_2 = \dot{I}_0 W_1$$

n 忽略 I_0 时

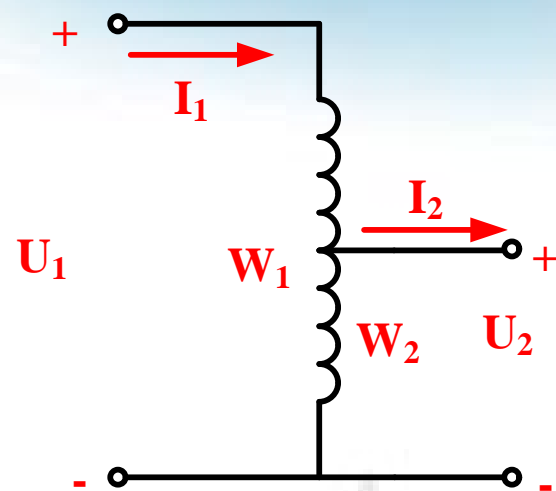
$$\dot{I}_1(W_1 - W_2) + (\dot{I}_1 - \dot{I}_2)W_2 = 0$$



$$\dot{I}_1 W_1 = \dot{I}_2 W_2$$



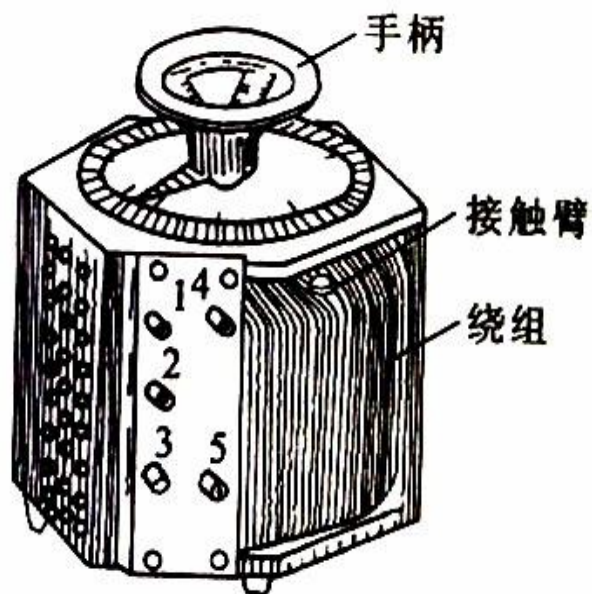
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{1}{k}$$



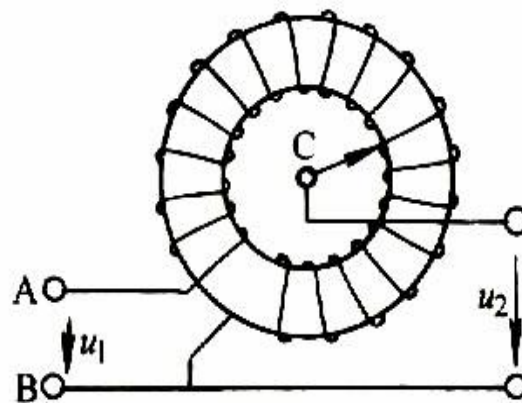
5.1 自偶变压器

○ 自偶调压器

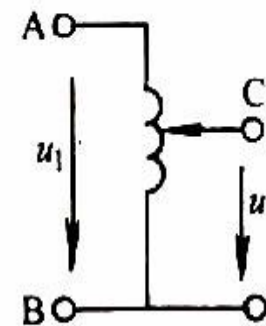
低压小容量的自耦变压器，其二次绕组的接头常做成沿线圈自由滑动的触头，它可以平滑地调节自耦变压器的二次绕组电压，这种自耦变压器称为自耦调压器。



a) 外形图



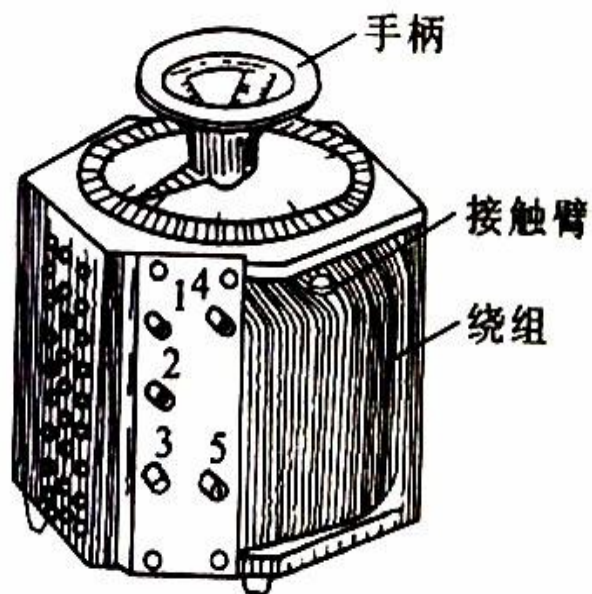
b) 电路原理图



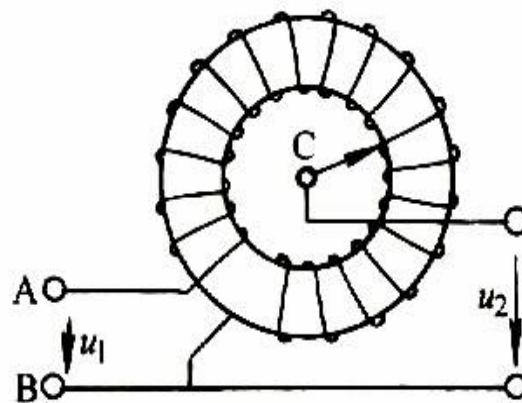
5.1 自偶变压器

○ 自偶调压器

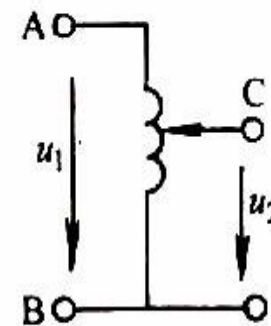
使用时，改变滑动端的位置，便可得到不同的输出电压。实验室中用的调压器就是根据此原理制作的。**注意：一次、二次侧千万不能对调使用**，以防变压器损坏。因为 W 变小时，磁通增大，电流会迅速增加。



a) 外形图



b) 电路原理图



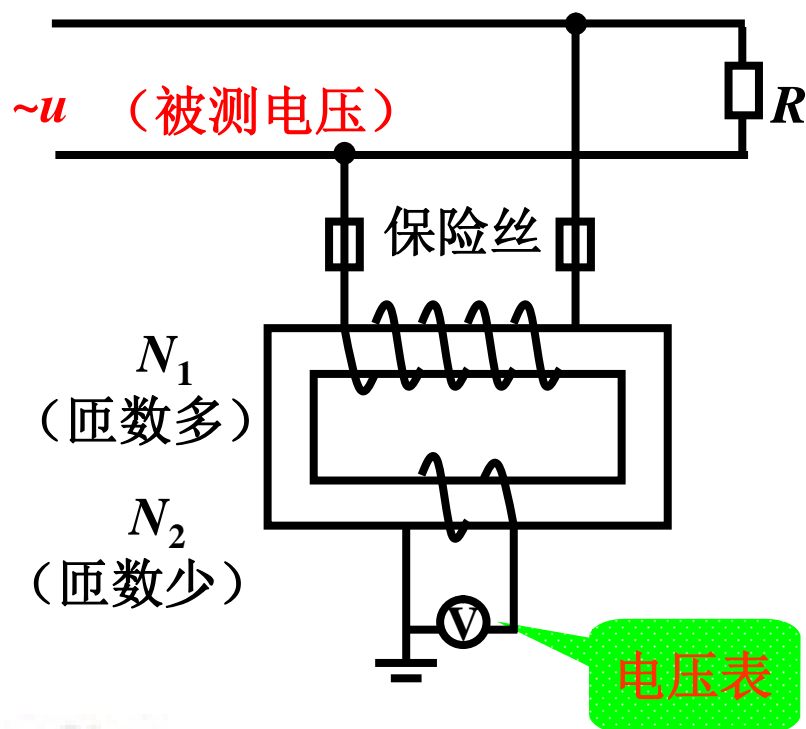
5.1 自偶变压器

○ 自偶变压器的优缺点

- n 自耦变压器具有结构简单、节省用铜量、其效率比一般变压器高等优点。
- n 其缺点是一次侧、二次侧电路中有电的联系，可能发生把高电压引入低压绕组的危险事故，很不安全，因此要求自耦变压器在使用时必须正确接线，且外壳必须接地，并规定安全照明变压器不允许采用自耦变压器结构形式。

5.2 电压互感器

○ 电压互感器--实现用低量程的电压表测量高电压



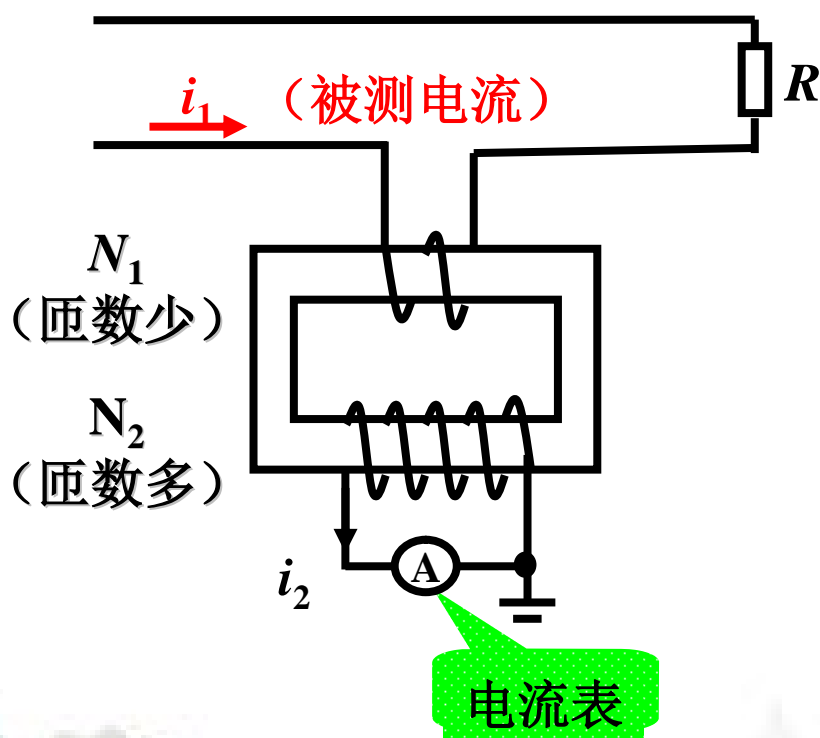
使用注意事项:

1. 二次侧不能短路，以防产生过流；
2. 铁心、低压绕组的一端接地，以防在绝缘损坏时，在二次侧出现高压。

被测电压=电压表读数 $\times W_1/W_2$

5.3 电流互感器

○ 电流互感器--实现用低量程的电流表测量大电流



使用注意事项:

1. 二次侧不能开路，以防产生高电压；
2. 铁心、低压绕组的一端接地，以防在绝缘损坏时，在二次侧出现过压。

$$\text{被测电流} = \text{电流表读数} \times W_2/W_1$$

5.4 隔离变压器

- 隔离变压器是指输入绕组与输出绕组带电气隔离的变压器，隔离变压器用以避免偶然同时触及带电体，变压器的隔离是隔离原副边绕线圈各自的电流。
- 隔离变压器的原理和普通变压器的原理是一样的。都是利用电磁感应原理。
- 一次侧与二次侧的电气完全绝缘。二次侧没有和大地构成回路，人接触任意一条线都不会发生触电。也可实现强电弱电隔离。
- 利用其铁芯的高频损耗大的特点，从而抑制高频杂波传入控制回路。